



RAPPORT D'ACTIVITÉ
2008-2013

LMGC

LABORATOIRE
DE
MÉCANIQUE
ET
GÉNIE CIVIL

UMR 5508, UNIVERSITÉ MONTPELLIER 2, CNRS



Table des matières

I	Présentation générale du LMGC	3
1	Historique et contexte	5
2	Politique scientifique	6
3	Contenu du rapport d'activité	7
II	Bilan scientifique des équipes de recherche	9
1	Equipe Assemblages Soudés (AS)	11
1	Contrôle des procédés et mesure des sollicitations en cours de soudage	12
2	Caractérisation des soudures et des assemblages	13
3	Modélisation et simulation numérique	15
2	Conception en Structures (CS)	21
1	Morphologie structurale	21
2	Structures à géométrie variable et enveloppes	22
3	Contrôle et dynamique des structures	23
4	Contrôle et dynamique des structures	25
3	Couplages en Géomécanique et Biomécanique (CGB)	35
1	Axe 1 : Géomécanique environnementale	36
2	Axe 2 : Tissus humains	38
3	Axe 3 : Approches couplés en milieux poreux	41
4	Mécanique de l'Arbre et du Bois (MAB)	49
1	Introduction	49
2	Axe 1 : effet du temps sur le comportement mécanique du bois	49
3	Axe 2 : origine biologique des propriétés mécaniques du bois	51
4	Axe 3 : caractérisation et modélisation multi-échelle du bois	53
5	Modélisation Mathématique en Mécanique (M3)	69
1	Changements d'échelles et réduction de dimension	70
2	Caractérisation du comportement des matériaux et des structures	73
3	Dynamique non-régulière	74
4	Problèmes divers	75
6	Physique et Mécanique des Matériaux Granulaires (PMMG)	87
1	Introduction	87
2	Présentation de l'équipe	87
3	Rayonnement et attractivité académiques	88
4	Interaction avec l'environnement social	89
5	Contours thématiques de l'équipe	90

7	Thermomécanique des Matériaux (ThM2)	111
1	Approche adoptée	112
2	Moyens et méthodes	113
3	Thermomécanique et Matériaux	114
4	Nouveaux périmètres	115
III	Bilan scientifique des structures associées : GPTR-MGC et laboratoire MIST	127
8	Grand Plateau Technique pour la Recherche (GPTR-MGC)	129
1	Activité du GPTR-MGC	129
2	Évolutions du GPTR	131
9	Laboratoire commun MIST	133
1	L'organisation	133
2	Bilan	134
IV	Bilan des Services communs	137
1	Réseau, Moyens Informatiques et Calcul Scientifique (ReMICS)	139
1	Infrastructure Informatique	140
2	Système d'information	141
3	Calcul Scientifique	142
2	Service expérimentation (ServEx)	149
1	Présentation du service	149
2	Activités du service	150
3	Evolution des activités du service	152

Première partie

Présentation générale du LMGC

1 Historique et contexte

Le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) est une Unité Mixte de Recherche de l'Université Montpellier 2 (UM2) et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, Institut de rattachement principal INSIS, Institut de rattachement secondaire INEE).

Le LMGMC est né de l'association en 1991 du Laboratoire de Mécanique Générale des Milieux Continus (LMGMC) et du Laboratoire de Génie Civil (LGC) de l'UM2, les deux unités étant déjà associées au CNRS.

Depuis cette association, le LMGMC a connu plusieurs évolutions qui ont façonné son identité actuelle. Sur le plan scientifique, des restructurations progressives et maîtrisées ont été réalisées. En termes d'organisation des lieux et des services, le déménagement et regroupement sur le site Saint Priest de l'UM2, la mutualisation des services communs et la mise en place d'une gouvernance appropriée, ont fortement marqué les vingt dernières années.

Au sein de l'UM2, le LMGMC est intégré au PFR MIPS (**Pôle de Formation et de Recherche** : Mathématiques, Informatique, Physique et Systèmes). Le PFR MIPS constitue une structure de concertation et de coordination des communautés qui le composent, avec des compétences larges et un rôle primordial d'interface entre les unités de recherches et la direction de l'Université. Les PFR disparaissent, au profit des CTE (Comités Thématiques d'Etablissement) en cours de mise en place et à vocation d'être plus ouverts sur d'autres entités du PRES régional. Malgré sa petite taille dans le PFR, Le LMGMC, et donc la discipline Mécanique et Génie Civil, est resté bien identifié au sein de l'UM2. Loin de céder aux inquiétudes de voir notre discipline complètement transparente face à des disciplines bien plus représentées sur le site, la dynamique collective du PFR MIPS et la réussite du projet commun du Labex Numev (Solutions Numériques, Matérielles et Modélisation pour l'Environnement et le Vivant) a, bien au contraire, permis de renforcer notre positionnement scientifique attaché à nos cœurs de métier, et ouvert sur de multiples interactions intra-MIPS et inter-PFR.

Par ailleurs, le LMGMC est l'une des trois unités de recherche implantées sur le campus Saint-Priest de l'UM2. Le LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier) est en totalité sur le site et l'IES (Institut d'Électronique du Sud) devrait l'être dès la livraison, prévue début de l'été 2014, du bâtiment 5 en cours de construction. Dans l'optique de ce regroupement sur le même site de nos trois unités, des discussions ont été entreprises avec les laboratoires du LIRMM et de l'IES en vue de définir ensemble une politique de site cohérente, rationnelle, et dynamique. D'un point de vue pratique cela nous a d'ores et déjà conduit à mettre en place des opérations de mutualisation de moyens, tant humains (PAO/COM, accueil, entretien) que matériels (véhicules, machines outils, salles de réunions, informatiques, outils de prévention). Mais au-delà de ces aspects de mutualisation, qui restent bien sûr primordiaux dans le cadre de la rigueur budgétaire, il ressort une véritable envie de mettre en place une politique scientifique de site, alliant recherche fondamentale et recherche technologique, avec comme ambition de devenir un acteur majeur de la recherche et de l'innovation en ingénierie au niveau régional et national. Avec l'accord de la présidence de notre Université, il a été décidé de donner à ce pôle scientifique STICS le nom d'Henri Pitot.

Les activités de recherche du LMGMC couvrent un large spectre de thématiques spécifiques qui font son identité dans le paysage de la Mécanique et du Génie Civil Français (Mécanique de l'Arbre et du Bois, Milieux Granulaires, Imagerie thermomécanique, Mécanique théorique et Numérique, structures légères, ...). Plus récemment, d'autres activités (assemblages soudés, mécanique du vivant et biomécanique, environnement, habitat, ...) se sont progressivement enracinées dans ce paysage ou sont en cours de l'être, favorisées par un contexte local et régional particulièrement favorables.

Les interactions de la mécanique avec la biologie, la chimie et les sciences de l'environnement, viennent élargir le périmètre des champs disciplinaires du site où les ressources mécaniques s'avèrent porteuses de richesses en termes d'interdisciplinarité.

2 Politique scientifique

Le contexte ci-dessus, en termes d'évolution des moyens et du paysage de la recherche, notamment au niveau local, nous a conduit à proposer pour l'actuel contrat un projet scientifique associant :

- des thématiques historiques qui font pour une grande part l'identité et la spécificité du LMGC dans le dispositif national de recherche en mécanique et Génie Civil (bois, tenségrité, milieux granulaires, mécaniques théorique et numérique, soudage, imagerie quantitative et identification, ...); item[-] des thématiques frontières, souvent à risque, mais qui permettent de repousser nos limites en proposant des recherches prospectives (couplage chimio-mécanique, interaction fluide-grain, instabilités dans un contexte multi-physiques, ...); item[-] des thématiques innovantes dans le contexte des opportunités offertes par les pôles de compétitivité régionaux et les axes pluridisciplinaires de l'UM2 (vivant, agro-environnement, ...).

Ce projet suggérait des enjeux stratégiques et des évolutions importantes, à la fois des thématiques de recherches, de la configuration des équipes et des services communs. Ceci devait également intégrer la dimension de renouvellement en masse de nombreux cadres du LMGC.

Les activités de recherches du LMGC sont axées sur 7 thématiques principales portées par les 7 équipes suivantes :

- Assemblages Soudés (AS), avec les trois aspects : Contrôle des procédés et mesure des sollicitations en cours de soudage, Caractérisation des soudures, Modélisation et simulation numérique. Équipe localisée principalement à l'IUT de Nîmes.
- Conception en Structures (CS), avec en plus de ses trois thèmes historiques Morphologie structurale, Structures à géométrie variable et enveloppes et Contrôle et dynamique des structures, le thème conception, perception, et communication.
- Couplages en Géomécanique et Biomécanique (CGB), avec deux axes (géomécanique environnementale et tissus humains) en rapport avec les domaines de l'environnement et du vivant dans un contexte pluridisciplinaire, et un axe transversale portant sur les approches multi-échelles des couplages en milieux poreux.
- Mécanique de l'Arbre et du Bois (MAB), avec des activités autour de trois axes de recherche, l'effet du temps sur le comportement mécanique du bois, l'origine biologique des propriétés mécaniques du bois et la caractérisation et la modélisation multi-échelles du bois. L'investigation à l'échelle de la microstructure et l'intégration des effets chimiques ont été des avancées importantes de MAB lors de ce contrat.
- Modélisation Mathématique en Mécanique (M3), avec deux principaux axes autour des changements d'échelles et de la réduction de dimension, d'une part, et la caractérisation du comportement des matériaux et des solides, d'autre part. Quelques pistes de recherche en émergence permettent à l'équipe d'interagir avec les autres équipes du laboratoire.
- Physique et Mécanique des Matériaux Granulaires (PMMG), avec des thématiques ayant pour originalité l'association des approches expérimentale et numérique à l'analyse physique, ce qui a permis d'aborder plusieurs applications à l'interface avec la mécanique des sols, la technologie des poudres, la géologie et la technologie agro-alimentaires.
- Thermomécanique des Matériaux (ThM2), dont les activités de recherche s'articulent autour du développement de techniques expérimentales spécifiques, du comportement des Matériaux et du développement de méthodes numériques (calculs couplés et identification de modèles), avec de fortes interactions académiques et industrielles.

Les deux équipes PMMG et CGB, créées au début de ce contrat, ont bénéficié d'un accompagnement collectif. Des moyens humains, des soutiens financiers et des locaux ont assuré à ces deux équipes des conditions particulièrement favorables à leur développement. Elles présentent des bilans respectifs très positifs à plusieurs points de vue (production scientifique, actions contractuelles, rayonnement, ...). Actuellement, elles sont en mesure d'acquiescer, en toute autonomie, les moyens nécessaires au développement de leurs thématiques.

Par ailleurs, l'unité assure un meilleur positionnement dans les domaines du vivant et de l'environnement et une meilleure insertion dans les priorités thématiques du site montpelliérain, et notamment

de l'UM2. La création des deux équipes PMMG et CGB a été un acte fort en ce sens au début de l'actuel contrat, et la forte participation au Labex Numev traduit une volonté de pousser la structuration dans ces domaines au delà des frontières de l'unité.

Dans ce contexte, toujours en évolution, le LMGC a donc su consolider et renforcer continuellement sa position en faisant fructifier ses thématiques spécifiques par des recherches amont structurantes. Il est resté attentif aux ouvertures porteuses de progrès et d'avancées en terme d'innovation dans de multiples domaines appliqués de l'industrie, de la santé et de l'environnement, comme en témoignent ses nombreuses collaborations académiques et industrielles.

3 Contenu du rapport d'activité

Compte tenu de la structuration du LMGC en sept équipes de recherche avec des thématiques bien identifiées, la suite de ce rapport est d'abord dédiée à la présentation des bilans scientifiques des différentes équipes. On trouvera ensuite un bilan des activités des deux structures associées GPTR-MGC et MIST. Enfin, on développera les activités des deux services communs ReMICS et SERVEX, compte tenu de leur caractère support à la recherche.

La production scientifique de chaque entité est présentée à la suite de ses activités. On a signalé par deux étoiles ** (respectivement trois étoiles ***) à la suite d'une publication RCL lorsque celle-ci est commune à deux (respectivement trois) équipes.

Deuxième partie

**Bilan scientifique des équipes de
recherche**

1 Equipe Assemblages Soudés (AS)

Intervenants : C. Bordreuil (MCF HDR), F. Deschaux-Beaume (PR), G. Fras (PR), S. Rouquette (MCF), F. Soulié (MCF)

Doctorants : J. Chapuis (MRT, 2007-soutenance en 2011), A. Niel (MRT, 2008-2011), V. Villaret (CIFRE, 2009-2012), S. Unnikrishnakurup (MRT, 01/2011-soutenance prévue en 2013), T. Mahjoub (Bourse Tunisienne, 2011-2014), A. Chiocca (MRT, 2012-2015), B. Mezrag (Bourse Algérienne, 2012-2015)

L'équipe Assemblages Soudés (AS) a été créée en 2003 à la suite de l'ouverture de deux formations en soudage par apprentissage sur le site de l'IUT de Nîmes, la formation d'ingénieur en Mécanique Structures Industrielles (MSI) créée en 1999, et la licence professionnelle Structures Métalliques Assemblages Soudés (SMAS) en 2003. Le développement de l'activité de l'équipe AS a profité de la politique de mutualisation des moyens de l'enseignement et de la recherche menée par l'IUT de Nîmes, qui lui a donné accès aux équipements du plateau technologique en soudage du département Génie Mécanique et Productique (GMP), en partie renouvelés grâce au financement provenant des deux formations par apprentissage. En contrepartie, il était attendu des membres de l'équipe un investissement significatif dans ces formations. L'équipe AS se distingue ainsi par une forte implication dans l'enseignement et une volonté de ses membres de lier activités d'enseignement et de recherche. Cette proximité a contribué à asseoir la réputation de l'équipe dans le milieu du soudage, puisque c'est l'une des seules équipes en France à avoir développé une spécialisation à la fois en formation et en recherche en soudage. Cette stratégie a permis à l'équipe de créer rapidement des liens avec les organismes de référence en France dans le domaine (Association Française du Soudage, Institut de Soudure, CEA) et plusieurs grandes entreprises. Des contrats ou partenariats de recherche ont ainsi été engagés au cours des cinq dernières années avec les entreprises Areva, Air Liquide, Arcelor Mittal et EDF. D'autre part, l'équipe intervient en tant que support scientifique dans le cadre d'un projet de création d'entreprise visant à développer un procédé innovant de fabrication additive à partir de fil métallique fondu par un arc électrique (projet CoATIG Process). Ce projet a été l'un des lauréats du concours de l'innovation 2011 d'Oseo.

Parmi les 5 membres permanents de l'équipe, 4 assurent des responsabilités au sein des formations : Frédéric Deschaux-Beaume est responsable du département GMP de l'IUT de Nîmes, Fabien Soulié est responsable de la formation d'ingénieur MSI de Polytech'Montpellier, Gilles Fras est responsable de la licence professionnelle SMAS, et Sébastien Rouquette est responsable de la préparation à la certification IWT (International Welding Technologist), délivrée dans le cadre de la licence SMAS. A travers cet investissement, l'équipe contribue activement à la diffusion des connaissances en soudage, domaine très peu développé dans le milieu universitaire Français en comparaison de pays voisins, du niveau licence jusqu'au niveau doctorat.

Au cours des 5 dernières années, 3 thèses se sont achevées au sein de l'équipe, et 3 autres ont démarré. L'équipe assure également la co-direction d'une thèse de l'ENI de Tunis portant sur la modélisation du soudage MIG.

La période a aussi été marquée par la poursuite et la clôture du projet TEMMSA portant sur le développement de systèmes de mesures in-situ sur banc de soudage à l'arc, financé par l'ANR dans le cadre de l'appel à projets « Jeunes Chercheurs ». Le projet, porté par Cyril Bordreuil, s'est achevé

fin 2011.

Les membres de l'équipe ont participé durant la période à l'organisation de plusieurs colloques et séminaires : organisation du premier symposium en productique de l'Eurorégion Pyrénées-Méditerranée à Montpellier en 2010 suite à la création à l'initiative de membres de l'équipe d'un réseau eurorégional de productique, participation à l'animation de la Conférence Internationale sur le Soudage, le Contrôle Non Destructif et l'Industrie des Matériaux et Alliages (IC-WNDT-MI12) à Oran en 2012, organisation du séminaire « Instrumentation en Soudage » à Nîmes en avril 2013. Les membres de l'équipe sont aussi impliqués dans des réseaux nationaux : comité « soudage » de l'Association Titane, et GDR « Solidification des Alliages Métalliques » (SAM).

Les thèmes de recherche de l'équipe AS portent sur l'étude de l'influence des procédés de soudage à l'arc sur les caractéristiques des soudures et des assemblages. Les travaux de recherche sont réalisés autour de 3 axes :

- l'observation et la mesure in situ en cours de soudage, de manière à connaître le plus précisément possible les sollicitations subies par la matière en fonction des paramètres du procédé ;
- la caractérisation microstructurale et mécanique des soudures, en relation avec les paramètres procédé ;
- la modélisation et la simulation numérique des phénomènes physiques intervenant pendant l'opération de soudage, pour accéder aux informations qui ne peuvent être directement mesurées ou observées et/ou faciliter l'interprétation des résultats expérimentaux.

1 Contrôle des procédés et mesure des sollicitations en cours de soudage

Intervenants : F. Soulié, C. Bordreuil, F. Deschaux-Beaume, G. Fras

Doctorants : J. Chapuis, A. Chiocca, B. Mezrag, A. Niel, S. Unnikrishnakurup, V. Villaret

Des techniques expérimentales spécifiques ont été utilisées et développées afin de permettre l'observation de phénomènes très rapides et la mesure de différentes grandeurs physiques en cours de soudage, malgré les conditions très perturbatrices inhérentes à l'opération de soudage à l'arc. Les différentes études expérimentales ont pour double objectif d'améliorer, d'une part, la compréhension des phénomènes physiques mis en oeuvre et, d'autre part, de compléter les études numériques en fournissant des cas de validations réels et des données d'entrées pour alimenter les modèles.

1.1 Imagerie en soudage

L'observation du bain de fusion et des transferts métalliques en cours de soudage à l'arc a nécessité le développement de systèmes d'éclairage et de filtrage permettant de s'affranchir du rayonnement perturbateur de l'arc dans des situations très diverses liées à la nature des procédés, matériaux, gaz et énergies utilisées. Les outils d'imagerie mis en oeuvre sont complémentaires : caméras CCD classiques permettant des acquisitions en champs larges (températures par exemple avec l'utilisation de modèles radiométriques) et caméras numériques rapides permettant l'observation de phénomènes très rapides (mouvements du bain de fusion par exemple) grâce à des fréquences d'acquisition de plusieurs kHz et une sensibilité améliorée dans le proche infrarouge.

Au-delà de l'aspect qualitatif lié à la possibilité d'appréhender des phénomènes très rapides et dans des conditions très difficiles, l'observation avec des caméras numériques rapides autorise des études quantitatives. L'analyse des images avec des bibliothèques numériques développées spécifiquement permet en effet des mesures au niveau du bain de fusion et de son voisinage immédiat. Cette approche est particulièrement intéressante pour l'étude du suivi des interfaces. Le suivi des interfaces liquide/solide permet la mesure de la croissance du bain de soudage depuis la phase d'amorçage jusqu'à la solidification complète en soudage TIG, mesure de la forme des fronts de solidification

et des vitesses de propagation. Le suivi des interfaces liquide/gaz permet d'étudier le détachement des gouttes et mesure des vitesses de chute des gouttelettes au cours des phases de transferts en MIG/MAG. Ce travail a donné lieu à une collaboration avec le Canadian Centre for Joining and Welding de l'University of Alberta à Edmonton (Canada). L'étude des oscillations des gouttelettes en cours de transfert dans l'arc électrique, grâce à l'imagerie rapide, donne également accès à la tension de surface.

1.2 Mesures couplées

Les dispositifs d'imagerie peuvent être associés à un ensemble de mesures plus larges : mesures de paramètres procédés (tension, intensité), thermocouples, jauges de déformations... dans un dispositif adapté aux contraintes spécifiques du soudage à l'arc en terme d'environnement parasite et de variété d'échelles de mesure. Le couplage et la synchronisation de cet ensemble de mesures permet une meilleure caractérisation des transferts de matière et d'énergie entre la source et la pièce, mais aussi une meilleure définition de la répartition thermique réelle au voisinage du bain de fusion et dans la pièce métallique. Ces données expérimentales constituent une source d'information importante pour la validation de la simulation numérique. Cette méthode de couplage des mesures a été employée dans le cadre du projet multipartenaires BA3, financé par Areva en 2008-2009, qui regroupait plusieurs laboratoires (DIPI de l'ENISE, LIMATB de l'Université de Bretagne Sud, IUSTI de l'Université de Provence) et avait pour objectif de rassembler des données quantitatives sur les caractéristiques du bain de fusion obtenu en soudage à l'arc TIG, en vue de la validation de la modélisation de l'apport de chaleur. Elle a aussi été appliquée à la validation de la simulation numérique du soudage TIG dans le cadre d'une prestation de recherche pour EDF. Ces dispositifs de mesures couplées ont également été utilisés dans le cadre de la thèse d'Aurélie Niel pour étudier la localisation de l'initiation de la fissuration à chaud en fonction de paramètres procédés, ainsi que dans le cadre de la thèse de Vincent Villaret pour alimenter puis valider la modélisation de la transition colonnaire/équiaxe dans la zone de fusion.

1.3 Mesures couplées

L'approche expérimentale développée par l'équipe permet également une étude plus approfondie des sources de courant contrôlées qui mettent en oeuvre des synergies particulières et des cycles pulsés et alternatifs assez complexes. Il est ainsi possible de mieux appréhender l'influence de différents paramètres de pilotage du cycle du courant sur les phénomènes impliqués dans les transferts métalliques ou la formation/solidification du bain de fusion. L'étude des transferts et des mouvements de fil a ainsi pu être mise en oeuvre pour plusieurs procédés dits « froids » dans le cas du soudage MIG/MAG. Les relations entre les paramètres du cycle de courant et les phénomènes physiques intervenant durant le transfert avec ces procédés ont notamment été étudiées dans le cadre de 2 collaborations de recherche, avec l'Institut des Matériaux Jean Rouxel de l'université de Nantes, et avec la société Areva. En soudage TIG, l'influence de la forme du courant sur la cinétique de solidification et donc la formation de dendrites est mise en évidence dans le cadre de la thèse d'Alexis Chiocca.

2 Caractérisation des soudures et des assemblages

Intervenants : F. Deschaux-Beaume, C. Bordreuil, S. Rouquette, F. Soulié

Doctorants : A. Chiocca, B. Mezrag, A. Niel, S. Unnikrishnakurup, V. Villaret

Cet axe de recherche porte sur la caractérisation des microstructures générées et des caractéristiques mécaniques macroscopiques des soudures et des assemblages, et leur corrélation avec les paramètres du procédé.

2.1 Evolution des microstructures en cours de soudage

L'opération de soudage affecte considérablement la microstructure des matériaux, et donc modifie leurs propriétés d'usage. L'étude des corrélations entre les paramètres du procédé et les transformations subies par la matière est menée dans l'objectif à la fois de mieux comprendre les phénomènes physiques, et de permettre l'optimisation des conditions de soudage.

Les travaux de thèse d'Arnaud Duchosal, achevés en 2006 avaient permis d'initier une collaboration avec l'université de Zacatecas (Mexique) dans le domaine de l'évolution des microstructures subies en cours de soudage par des aciers réfractaires moulés. La collaboration s'est poursuivie durant cette période, et a donné lieu à 2 publications.

Dans le cadre des thèses d'Aurélié Niel et Vincent Villaret, l'influence de la composition et des conditions de soudage sur la morphologie des grains formés en zone fondue avec les procédé TIG et MIG a été étudiée. Une transition entre morphologies de grains colonnaire et équiaxe (Columnar to Equiaxed Transition, ou CET), est souvent observée en zone fondue, qui peut modifier fortement les propriétés des assemblages, une morphologie équiaxe étant le plus souvent préférées. Dans l'alliage d'aluminium 6061, la transition a pu être expliquée par l'évolution des champs thermiques dans la zone de solidification, qui favorisait la surfusion constitutionnelle, et ainsi la germination de grains équiaxes devant le front colonnaire en croissance. La zone fondue obtenue lors du soudage MIG/MAG d'un acier inoxydable ferritique présentait quand à elle des morphologies très variables selon la composition des métaux d'apport employés. Une teneur minimale en titane s'est avérée nécessaire pour former une zone totalement équiaxe, indépendamment du régime thermique. Le phénomène a pu être expliqué par la formation de particules réfractaires riches en titane dans la zone de fusion, fournissant des sites favorisant la germination hétérogène de grains équiaxes dans la zone de surfusion.

Les travaux de thèse de Bachir Mezrag, menés en cotutelle avec l'université de Tlemcen (Algérie), visent à mieux comprendre l'influence des nombreux paramètres de soudage du procédé MIG-CMT, un procédé où le transfert de matière est « forcé » par un dévidage alterné du métal d'apport, sur les liaisons acier-aluminium. Le contrôle des paramètres permet d'ajuster le volume de métal déposé et l'énergie, et donc la température de l'interface acier-aluminium, qui gouverne la croissance des composés intermétalliques fragiles formés à l'interface.

2.2 Fissuration à chaud en soudage

La thèse de Vincent Villaret, réalisée dans le cadre d'un contrat Cifre avec la société Air Liquide, portait sur le développement d'un matériau d'apport améliorant la tenue à la corrosion et à la fatigue thermique d'assemblages en acier inoxydable ferritique réalisés en soudage MIG, destinés à la fabrication de collecteurs d'échappement. L'optimisation de la composition du matériau d'apport et des conditions de soudage a permis d'obtenir des zones fondues sensiblement homogènes en terme de composition et de morphologie de grains, en favorisant la germination hétérogène de grains équiaxes à partir de substrats solides formés grâce aux éléments d'addition retenus. La tenue à la corrosion et à la fatigue thermique, ainsi que les propriétés en traction à chaud des zones fondues et des assemblages ont été caractérisées, dans le cadre d'une collaboration avec Arcelor Mittal. En contrôlant la composition des produits d'apport utilisés, en particulier les teneurs en molybdène, mais surtout en éléments mineurs Ti et Nb, il a été possible d'obtenir des assemblages avec des zones fondues présentant une résistance mécanique à haute température supérieure à celle des métaux de base, une tenue à l'oxydation presque équivalente, et une résistance à la fatigue thermique des assemblages bien supérieure à celle obtenue avec des produits d'apport plus classiques. Une collaboration est engagée avec le Centre de Recherche en Soudage et Contrôle (CSC) d'Alger (Algérie) et le LSPM de l'université Paris Nord pour optimiser les modes opératoires de soudage de l'alliage de titane TA6V. Le développement du protocole de soudage est réalisé dans l'équipe AS. La microstructure des assemblages sera caractérisée au LSPM de l'université Paris Nord, et les essais de caractérisation mécanique seront réalisés au CSC.

2.3 Caractérisation des assemblages

La fissuration qui peut intervenir en cours de soudage est l'un des défauts les plus critiques, puisqu'il réduit fortement la durée de vie des structures assemblées. Son apparition est liée à la conjonction d'une microstructure "sensible" et d'un niveau de contrainte critique, produit par les dilatations et contractions thermiques générées par l'opération de soudage.

Le phénomène de fissuration à chaud, qui intervient en soudage au moment de la solidification de la zone fondue, a été étudié dans le cadre de la thèse d'Aurélié Niel pour un alliage d'aluminium 6061. Cet alliage a été choisi pour sa grande sensibilité au phénomène de fissuration à chaud. Grâce à un banc d'essai spécialement développé pour l'étude, qui permet de contrôler les conditions de bridage ou le chargement de l'éprouvette d'essai, l'influence des conditions de soudage sur les microstructures formées, les niveaux de contraintes générés et le risque de fissuration à chaud a été étudiée, et une interprétation du phénomène de fissuration à chaud, basée sur une modélisation développée par Rappaz et al. (cf. 3.1), a pu être proposée.

3 Modélisation et simulation numérique

Intervenants : C. Bordreuil, G. Fras, S. Rouquette

Doctorants : T. Mahjoub, A. Niel, S. Unnikrishnakurup, V. Villaret

Lors de la dernière période, l'équipe a développé ses compétences dans le domaine des méthodes numériques appliquées aux procédés de soudage. Ces méthodes ont été menées à travers trois thèses et un travail de Master. La première thèse est celle d'Aurélié Niel qui a travaillé sur la fissuration à chaud et a été soutenue en 2011. La seconde est celle de Sreedhar Unnikrishnakurup portant sur le développement d'une méthode inverse et sera soutenue en 2014. La troisième est celle de Taissir Mahjoub, thèse réalisée en collaboration avec l'ENI de Tunis, qui devrait être soutenue fin 2013 et dont le sujet porte sur la modélisation multiphasique du procédé MIG. Le travail de master d'Adil Benarbia a porté sur une modélisation granulaire de la zone pâteuse. Ces développements ont suivi les actions prévues dans le précédent projet. Ces analyses se sont centrées sur les transferts de chaleur (A. Niel, S. Unnikrishnakurup) et de masse (T. Mahjoub) pour prédire et apporter des éléments de compréhension à certains mécanismes observés pouvant limiter l'intégrité des assemblages soudés.

3.1 Approche micro – méso – macro (Aurélié Niel- Adil Benarbia)

Les travaux de l'équipe ont toujours mis l'accent sur une approche intégrée métallurgie – mécanique – procédé. La caractérisation expérimentale de la fissuration à chaud de l'alliage d'aluminium 6061 a montré qu'il existait des interactions fortes entre procédé, microstructure et comportement mécanique, et qu'elles se déroulaient dans la zone en fin de solidification où phases liquide et solide coexistent (cf. 2.3). A. Niel a développé un modèle numérique multi-échelles basé sur une modélisation thermo-mécanique du procédé et une modélisation simplifiée de la microstructure en cours de solidification. La modélisation thermo-mécanique du procédé est basée sur une approche continue du milieu. La modélisation de la génération de la microstructure est basée sur le champ de température. La microstructure obtenue est constituée d'un ensemble discret et indépendant de grains équiaxes et colonnaires. Sur cette microstructure en cours de solidification, un modèle moyenné à deux phases basé sur les développements de Rappaz et al. a été adapté et permet de déterminer le niveau de dépression dans la phase liquide dans les grains colonnaires. Les résultats obtenus par cette approche multi échelles prédisent le lieu de l'apparition de la fissuration et permettent à partir de la connaissance des champs macroscopiques de proposer des voies d'améliorations au niveau du procédé pour limiter la fissuration à chaud.

Le travail d'A. Niel a permis de faire le lien entre différentes échelles et différents phénomènes physiques. Dans le but d'apporter une description plus précise des mécanismes physiques induits au cours de la solidification, une modélisation mésoscopique a été développée par A. Benarbia dans son travail de Master. Il a développé un modèle numérique basé sur LMG90, l'application développée

par le laboratoire, pour prédire les interactions au cours de la solidification entre le réseau liquide intergranulaire et les grains se solidifiant.

3.2 Méthode inverse (Sreedhar Unnikrishnakurup)

Dans le but d'approcher plus finement l'interaction entre l'arc et le bain fondu, S. Unnikrishnakurup a développé un modèle thermo-magnéto-hydrodynamique intégrant l'ensemble des forces jouant un rôle prépondérant lors de l'établissement de la forme du bain (Boussinesq, Marangoni, Lorentz...). L'interaction entre le plasma et la pièce est modélisée à travers un flux de chaleur le long de l'interface plasma – pièce métallique. Ce flux de chaleur a été modélisé avec une fonction gaussienne qui est paramétrée par la tension et l'intensité de soudage mais aussi le rendement du procédé TIG et la largeur de la distribution radiale de la gaussienne. Ces deux derniers paramètres requièrent d'être estimés à l'aide d'une méthode inverse. La méthode de Levenberg-Marquardt a été employée pour régulariser le problème inverse. Les données expérimentales utilisées sont les évolutions de la température fournies par plusieurs thermocouples et l'évolution du rayon du bain de fusion (cf. 1.1). L'ensemble des développements a été réalisé à l'aide de Comsol pour la simulation directe et Matlab pour la méthode inverse.

3.3 Echanges de masse et de chaleur au cours d'un procédé MIG (Taissir Mahjoub)

La connaissance de la distribution du champ des vitesses et des températures dans le bain liquide est primordiale pour la prédiction des morphologies de solidification. Afin d'apporter des éléments de compréhension sur ces répartitions, Taissir Mahjoub a développé un modèle prenant en compte l'apport de matière et le comportement des différentes interfaces. La modélisation des écoulements est réalisée à l'aide d'une formulation multiphasique, avec un modèle de transfert inter-fluide, ou non-homogène. Cette modélisation suppose que chaque phase possède sa propre distribution de vitesse et de température. Les fractions volumiques sont calculées sur chaque volume de contrôle et l'interface entre les phases est déterminée par la méthode Volume of Fluid (VOF). Les transferts de chaleur, de masse et de quantité de mouvement sont modélisés lors de la pénétration de la goutte de métal liquide dans le bain de fusion et le long de l'interface solide-liquide. L'ensemble des développements sont réalisés sous Ansys CFX et sont confrontés au travail sur la macro goutte réalisé dans le cadre de la thèse de Julien Chapuis.

Bibliographie

Articles dans des revues

- [A.1] A. Duchosal, **F. Deschaux-Beaume**, **C. Bordreuil**, **G. Fras**, and P. Lours. Method for predicting risk of cracking during weld repair of heat resistant cast steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 13 :126–135, 2008.
- [A.2] G. Sierra, **C. Bordreuil**, P. Peyre, **F. Deschaux-Beaume**, D. Stuart, and **G. Fras**. Modélisation thermo-diffusionnelle de l’assemblage hétérogène acier/aluminium par mouillage réactif. *Mécanique & Industries*, 9 :139–143, 2008.
- [A.3] G. Sierra, P. Peyre, **F. Deschaux-Beaume**, D. Stuart, and **G. Fras**. Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes,. *Materials Characterization*, 59 :1705–1715, 2008.
- [A.4] G. Sierra, P. Peyre, **F. Deschaux-Beaume**, D. Stuart, and **G. Fras**. Steel to aluminium braze-welding by laser process with and Al-12Si filler wire. *Science and Technology of Welding and Joining*, 13 :430–437, 2008.
- [A.5] G. Sierra, **B. Wattrisse**, and **C. Bordreuil**. Structural analysis of steel to aluminum welded overlap joint by digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 48 :213–223, 2008. **.
- [A.6] **F. Soulié**. Etude micromécanique de la cohésion par la capillarité dans les milieux granulaires humides. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 12 :279–290, 2008.
- [A.7] T. Branza, **F. Deschaux-Beaume**, G. Sierra, and P. Lours. Study and prevention of cracking during weld-repair of heat-resistant cast steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 :536–547, 2009.
- [A.8] T. Branza, **F. Deschaux-Beaume**, P. Velay, and P. Lours. A microstructural and low-cycle fatigue investigation of weld-repaired heat-resistant cast steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 :944–953, 2009.
- [A.9] **F. Deschaux-Beaume**, N. Fréty, T. Cutard, and C. Colin. Oxidation modeling of a Si₃N₄-TiN composite : Comparison between experiment and kinetic models. *Ceramics International*, 35 :1709–1718, 2009.
- [A.10] **S. Rouquette**, E. Rouhaud, M. François, and A. Roos. Coupled thermomechanical simulations of the shot-peening process : effects of the temperature on the residual stress field. *Journal of Materials Processing Technology*, page ., 2009.
- [A.11] **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, **M.S. El Yousoufi**, and **F. Radjai**. Compressive strength of an unsaturated granular material during cementation. *Powder Technology*, pages 308–311, 2011. **.
- [A.12] **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, **M.S. El Yousoufi**, and **F. Radjai**. From liquid to solid bonding in cohesive granular media. *Mechanics of Materials*, pages 529–537, 2011. **.
- [A.13] J.-P. Gras, **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, and **M.S. El Yousoufi**. DEM and experimental analysis of the water retention curve in polydisperse granular media. *Powder Technology*, 2 :296–300, 2011. **.

- [A.14] I.A. Sustaita-Torres, S. Haro-Rodríguez, M.P. Guerrero-Mata, M. De La Garza, E. Valdés, **F. Deschaux-Beaume**, and R. Colas. Aging of a cast 35Cr-45Ni heat resistant alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 133 :1018–1023, 2012.
- [A.15] V. Villaret, **F. Deschaux-Beaume**, J.-M. Fortain, **G. Fras**, and F. Januard. Weldability of New Ferritic Stainless Steel For Exhaust Manifold Application. *Advanced Materials Research*, 445 :777–782, 2012.
- [A.16] J. Chapuis, **F. Soulié**, **C. Bordreuil**, and **G. Fras**. Behaviour of spreading molten metal drops deposited by fusion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 48 :29–36, 2013.
- [A.17] A. Duchosal, **F. Deschaux-Beaume**, P. Lours, S. Haro, and **G. Fras**. Analysis of weld-cracking and improvement of the weld-repair process of superplastic forming tools. *Materials and Design*, 46 :731–739, 2013.
- [A.18] **A. Niel**, **C. Bordreuil**, **F. Deschaux-Beaume**, and **G. Fras**. Modelling hot cracking in 6061 aluminium alloy weld metal with microstructure based criterium. *Science and Technology of Welding & Joining*, 18 :154–160, 2013.
- [A.19] V. Villaret, **F. Deschaux-Beaume**, **C. Bordreuil**, **G. Fras**, C. Chovet, B. Petit, and L. Faivre. Characterization of Gas Metal Arc Welding welds obtained with new high Cr-Mo ferritic stainless steel filler wires. *Materials and Design*, 51 :474–483, 2013.
- [A.20] V. Villaret, **F. Deschaux-Beaume**, **C. Bordreuil**, **S. Rouquette**, and C. Chovet. Influence of filler wire composition on weld microstructures of a 444 ferritic stainless steel grade. *Journal of Materials Processing and Technology*, 213 :474–483, 2013.

Participations à un ouvrage

- [B.1] **M.S. El Youssoufi**, **F. Radjai**, R. Vincent, and **F. Soulié**. Capillary cohesion of wet granular media. In F. Nicot et R. Wan, editor, *Micromechanics of Failure in Granular Geomaterials*, page 37. Wiley-Iste, 2009.
- [B.2] **A. Niel**, **F. Deschaux-Beaume**, **C. Bordreuil**, **G. Fras**, and J. M. Drezet. Hot tearing test for TIG welding of aluminum alloys : application of a stress parallel to the fusion line. In *Hot Cracking Phenomena in Welds III*, page 16p. Springer verlag, 2011.

Communications avec actes dans des colloques

- [C1.1] J. Chapuis, **C. Bordreuil**, **F. Soulié**, **G. Fras**, and **Y. El Kaïm**. Analyse expérimentale de distorsions induites en soudage. In *Actes du 19ème congrès Français de Mécanique*, page 5p., Marseille, France, 2009.
- [C1.2] J. Chapuis, **F. Soulié**, **C. Bordreuil**, and **G. Fras**. Caractérisation des oscillations du bain de fusion en GTAW. In *Mécanique et mécanismes des changements de phases*, page Id. 45, Aussois, France, 2009.
- [C1.3] J. Chapuis, **F. Soulié**, **C. Bordreuil**, **G. Fras**, **F. Deschaux-Beaume**, and **Y. El Kaïm**. Une méthode de mesures multi-physiques en soudage à l’arc sous flux gazeux. In *Validation de la simulation numérique du soudage : Comment choisir les méthodes de mesures ?*, pages 13–16, Paris, France, 2009.
- [C1.4] **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, **M.S. El Youssoufi**, and **F. Radjai**. numerical model for transition from liquid to solid bonding in cohesive granular media. In *Powders and Grains 2009*, pages 893–896, Golden, États-Unis, 2009.
- [C1.5] **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, **M.S. El Youssoufi**, and **F. Radjai**. Analyse expérimentale et numérique de la résistance mécanique d’un matériau granulaire en cours de cimentation. In *Actes du Colloque Sciences et Technologie des Poudres et Matériaux Frittés 2009*, page 1, Montpellier, France, 2009.

- [C1.6] **J.Y. Delenne, F. Soulié, M.S. El Yousoufi, and F. Radjai.** A numerical model for transition from liquid to solid bonding in cohesive granular media. In *Powders and grains 2009*, pages 893–896, Golden, États-Unis, 2009. AIP Conference Proceedings, Springer.
- [C1.7] **C. Bordreuil and F. Dubois.** A Generic Framework for Natural and Finite Element Method. In *Proceedings of the IV European Conference on Computational Mechanics*, page 2p., France, 2010.
- [C1.8] J. Chapuis, E. Romero, **C. Bordreuil, F. Soulié, and G. Fras.** Comportement d’une macrogoutte stationnaire en GMAW pulsée. In *MATERIAUX 2010*, page 12p., Nantes, France, 2010.
- [C1.9] J. Chapuis, E. Romero, **F. Soulié, C. Bordreuil, and G. Fras.** Dynamic behaviour of the weld pool in stationary GMAW. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Welding Science and Technology for Construction, Energy and Transportation*, pages 39–46, Istanbul, Turquie, 2010.
- [C1.10] M. Dal, P. Le Masson, M. Dumons, P. Gilles, and **F. Deschaux-Beaume.** Analyse préliminaire et mise en œuvre d’une instrumentation thermique destinée à l’estimation de la position d’un front de fusion. In *Congrès Français de Thermique*, page 6p., Le Touquet, France, 2010.
- [C1.11] **A. Niel, C. Bordreuil, F. Deschaux-Beaume, and G. Fras.** Essai de fissuration à chaud en soudage TIG sur un alliage d’aluminium 6061. In *Actes du 16ème Colloque National de la Recherche en IUT*, page 9p., Angers, France, 2010.
- [C1.12] **A. Niel, F. Deschaux-Beaume, C. Bordreuil, and G. Fras.** Influence de la microstructure lors d’essais de fissuration à chaud d’alliage d’aluminium 6061 en soudage TIG. In *Matériaux 2010*, page 12p., Nantes, France, 2010.
- [C1.13] **A. Niel, F. Deschaux-Beaume, C. Bordreuil, and G. Fras.** Hot-crack test for aluminium alloys welds using TIG process. In *14th International Conference on Experimental Mechanics*, page 7p., Poitiers, France, 2010.
- [C1.14] **A. Niel, F. Deschaux-Beaume, C. Bordreuil, G. Fras, and J. M. Drezet.** Hot tearing test for TIG welding of aluminium alloys : application of a tensile load parallel to the fusion line. In *Proceedings of the 3rd International Hot Cracking Workshop*, page 18p., Columbus, Ohio, États-Unis, 2010.
- [C1.15] **A. Niel, G. Fras, F. Deschaux-Beaume, and C. Bordreuil.** Development and modeling of hot tearing test in TIG welding of aluminum alloy 6056. In *ACMA 2010*, page 7p., Marrakech, Maroc, 2010.
- [C1.16] V. Villaret, **F. Deschaux-Beaume, F. Januard, J.-M. Fortain, G. Fras, and S. Rouquette.** Développement de nouveaux fils fourrés pour le soudage à l’arc d’aciers inoxydables ferritiques destinés à la fabrication des parties chaudes de ligne d’échappement automobile. In *Matériaux 2010*, page 11p., Nantes, France, 2010.
- [C1.17] V. Villaret, **F. Deschaux-Beaume, J.-M. Fortain, G. Fras, and F. Januard.** Weldability of new ferritic stainless steel for exhaust manifold application. In *14th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*, page 6p., Istanbul, Turquie, 2011.
- [C1.18] J. Chapuis, E. Roméro, **F. Soulié, and C. Bordreuil.** Experimental analysis of droplet-gas interaction during GMAW process. In *9th International Trends in Welding Research Conference*, page 5p., Chicago, États-Unis, 2012.

Communications sans actes dans des colloques

- [C2.1] J. Chapuis. Apparition du phénomène de humping en soudage grande vitesse. In *Couplages Multi Physiques à Hautes Températures 'Saint Galmier'*, France, 2009.
- [C2.2] J. Chapuis, **C. Bordreuil, F. Soulié, and G. Fras.** Apparition du phénomène de humping en soudage grande vitesse. In *Workshop Manufacturing 21*, Cachan, France, 2009.
- [C2.3] **A. Niel.** Etude et modélisation de la fissuration à chaud en soudage. In *Séminaire pluri formation "Couplages Multi Physiques à Hautes Températures"*, Saint Galmier, France, 2009.

- [C2.4] **A. Niel, G. Fras, F. Deschaux-Beaume, and C. Bordreuil.** Caractérisation de la sensibilité à la fissuration à chaud en soudage TIG d'alliages d'aluminium. In *Colloque Mecamat*, France, 2009.
- [C2.5] **A. Niel, C. Bordreuil, F. Deschaux-Beaume, and G. Fras.** Simulation numérique d'un essai de fissuration à chaud en soudage TIG sur un alliage d'aluminium 6061. In *8ième journée Simulation Numérique du Soudage*, France, 2010.
- [C2.6] **J.Y. Delenne, V. Richefeu, F. Radjai, and F. Soulie.** Modeling of liquid equilibrium states in granular materials. In *GM3 Geo-mechanics : From micro to macro, UK 9th Travelling Workshop*, Imperial College London, Royaume-Uni, 2011.
- [C2.7] **J.Y. Delenne, F. Soulié, and F. Radjai.** Phénomènes granulaires dans l'environnement. In *59ième Congrès de l'Union des Professeurs de Physique et Chimie (UdPPC)*, Montpellier, France, 2011.
- [C2.8] **A. Niel, F. Deschaux-Beaume, C. Bordreuil, and G. Fras.** Développement d'un essai de caractérisation de la sensibilité à la fissuration à chaud de tôles minces en soudage TIG. In *Journée sur le soudage de l'aluminium 'IS Villepinte'*, France, 2011.
- [C2.9] **A. Niel, F. Deschaux-Beaume, C. Bordreuil, and G. Fras.** Microstructure influence on hot cracking of AA 6061 in TIG welding. In *Euromat 2011 Montpellier*, France, 2011.
- [C2.10] V. Villaret, **F. Deschaux-Beaume, G. Fras, J.-M. Fortain, and F. Januard.** A new metal core filler wire for welding ferritic stainless steel used for exhaust manifolds manufacturing. In *Euromat 2011 Montpellier*, France, 2011.
- [C2.11] **J.Y. Delenne, V. Richefeu, F. Radjai, and F. Soulie.** Lattice Boltzmann modelling of liquid-gas phase changes in a granular material. In *International Symposium on Discrete Element Modelling of Particulate Media*, Birmingham, Royaume-Uni, 2012.
- [C2.12] V. Richefeu, **J.Y. Delenne, F. Radjai, and F. Soulie.** Liquid clustering and capillary cohesion in a granular materials : Lattice Boltzmann modeling. In *13èmes Journées de Matière Condensée (JMC13)*, Montpellier, France, 2012.

Conférences invitées

- [I.1] S. Knupfer, **S. Rouquette**, and A.J. Moore. Straightening of distorted welded plates by iterative laser forming. In *2nd International workshop on thermal forming and welding distortion*, Bremen, Allemagne, 2008.
- [I.2] P. Lours, T. Branza, and **F. Deschaux-Beaume.** Weld-repair of heat resistant cast steels for SFP dies. In *6th European Conference on superplastic forming Euro SFP08*, Carcassonne, France, 2008.

HDR

- [H.1] **F. Deschaux-Beaume.** *Matériaux et assemblages hétérogènes : de l'élaboration à la caractérisation mécanique.* PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, June 2009.

Thèses

- [T.1] J. Chapuis. *Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc.* PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, March 2011.
- [T.2] **A. Niel.** *Étude et modélisation du phénomène de fissuration à chaud en soudage à l'arc : Application à l'alliage d'aluminium 6061.* PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, November 2011.

2 Conception en Structures (CS)

Intervenants : J. Averseng (MCF), F. Cevaër (MCF), B. Dresp-Langley (CR CNRS), J.F. Dubé (PR), M.N. Kazi-Aoual (MCF), B. Maurin (PR), R. Motro (PR, émérite depuis 2010), J. Quirant (MCF), S.B. Amouri (thèse en cours), Fanny Georges (post-doc 2008-2010),

Doctorants : M. Bagneris (thèse 2006-2009), A.D. Nguyen (thèse 2006-2009), C. Silvestri (thèse 2006-2009), Y. Boumenir (thèse 2008-2011), S. Morterolle (thèse 2008-2011), Y. Chélin (thèse 2009-2012), B. Amouri (MRT, 2011-soutenance prévue en 2014), C. Batier (BDI CNRS, 2012-2015).

1 Morphologie structurale

Intervenants : M.N. Kazi-Aoual (MCF), B. Maurin (PU), R. Motro (PU, émérite depuis 2010),

Doctorants : Y. Chélin (thèse 2009-2012), M. Bagneris (thèse 2006-2009).

Conception des enveloppes à forme complexe

Ces dernières décennies sont marquées par l'émergence de formes architecturales caractérisées par une absence d'orthogonalité. Incités par le progrès de la représentation numérique, des architectes génèrent des projets aux formes complexes dits « non-standard » dont la réalisation soulève de nombreux problèmes. Ces études, menées dans le cadre de la thèse de M. Bagneris, ont ainsi visé à apporter des éléments de réponse en centrant la réflexion autour du paramètre de forme, de sa génération à sa réalisation, en assurant une meilleure opérabilité entre les acteurs du processus de conception (architectes/ingénieurs/entrepreneurs). On a d'abord proposé une classification des formes à partir de la morphologie structurale puis mis en évidence les cas où la forme s'exclut des autres paramètres de conception et pour lesquels les outils de l'ingénierie révèlent leurs limites. Un nouvel outil de génération basé sur les formes pascaliennes ou pFormes a alors été développé : cette approche géométrique des formes gauches utilise des règles génératives simples, ce qui assure une compréhension et une maîtrise de leur génération tout en conduisant à des potentialités opérationnelles. Un panel d'outils basés sur l'exploitation des propriétés géométriques pour élaborer des solutions d'ordres mécanique et technique a ensuite été proposé. Enfin, la démarche a été étendue aux formes immergées. La pertinence et l'efficacité de ces propositions ont été discutées à partir d'études de cas. Par ailleurs, des développements sur des alternatives morphologiques innovantes ont été menés, soulignant leur richesse sur le plan structurel, mécanique et technologique.

Biomécanique cellulaire et morphogenèse tissulaire

L'étude des formes de la nature, de leur diversité, de leur reproductibilité ainsi que de leurs origines a toujours suscité un vif intérêt et, en particulier, la forme polygonale des cellules au sein des épithéliums monocouches, depuis leur observation par Hooke en 1665. Le travail de thèse de Y. Chélin, mené en relation avec des collègues biologistes de l'UM2 (ISEM) a ainsi eu pour objectif une meilleure compréhension de la morphogenèse de ces tissus. Pour y parvenir, trois approches ont été combinées : la biologie expérimentale du développement, l'analyse biostatistique et, principalement ici, la modélisation bio- mécanique et numérique. L'hypothèse d'une influence des efforts mécaniques dans l'organisation des épithéliums monocouches en formation a conduit au développement d'un

modèle bidimensionnel de cellules, basé sur la physique des milieux divisés et permettant une plasticité de forme ainsi qu'une capacité de libre auto-organisation. Les simulations de morphogenèse de tissus constitués de ces cellules ont alors, d'une part, été confrontées aux observations et, d'autre part, permis de faire varier des paramètres difficilement accessibles expérimentalement, principalement ceux régissant l'évolution cellulaire ainsi que les conditions aux limites. Les résultats issus de ces simulations ont ainsi permis de corroborer ceux provenant des expérimentations : les tissus non prolifératifs sont plus organisés que les prolifératifs et l'apoptose semble jouer un rôle stabilisateur de la morphogenèse des épithéliums prolifératifs. En outre, les études numériques ont montré que l'organisation des tissus non prolifératifs semble décroître quand leur vitesse de développement augmente. Par ailleurs, les tissus paraissent plus organisés avec une division et une apoptose contrôlées par des critères mécaniques plutôt que lorsque le système prolifère suivant des critères aléatoires. Ces travaux ont ainsi montré l'importance des interactions mécaniques dans le processus de morphogenèse épithéliale, ils constituent une base prometteuse pour des études futures dans ce domaine (tridimensionnelles, structuration du cytosquelette, tissus hyperprolifératifs, etc.).

2 Structures à géométrie variable et enveloppes

Intervenants : F. Cevaër (MCF), B. Maurin (PU), J. Quirant (MCF),

Doctorants : S. Morterolle (thèse 2008-2011), A.D. Nguyen (thèse 2006-2009).

Modélisation cinématique et mécanique du pliage de systèmes légers

Sur les systèmes légers pliables-déployables, et plus particulièrement les systèmes de tenségrité, les expérimentations menées sur des prototypes ont montré que la mise en œuvre de l'autocontrainte et son réglage étaient deux points majeurs pour assurer le comportement souhaité du système. C'est pourquoi nous avons continué le développement d'un tensiomètre permettant une mesure précise des tensions, quels que soient la tension en place et le diamètre des câbles testés. Des modélisations du comportement du câble théorique et numériques, puis des expérimentations ont permis de valider le modèle préconisé.

Par ailleurs, les expérimentations sur le pliage ont mis en exergue la difficulté, au niveau des nœuds du système, d'assurer à la fois les fonctions mécaniques (cinématiques et sthéniques) tout en assurant une stabilité et une maîtrise suffisante de la géométrie. Des études ont donc été engagées pour la conception de nœuds plus efficaces.

Une étude mécanique plus poussée de l'anneau de tenségrité précédemment étudié, au travers d'une étude analytique, a permis de proposer une modélisation qui permet d'envisager une homogénéisation du comportement et la création de 'super-éléments poutre' pour une modélisation élément-finis. Des échanges ont également été établis avec un bureau d'études pour la réalisation d'une passerelle piétonne en Géorgie à base d'anneaux de tenségrité, mais pour l'instant, le projet est à l'arrêt.

Systèmes légers déployables

L'expertise acquise dans la conception de systèmes légers innovants ouvre des domaines d'application au-delà de celui du génie civil. Cela concerne par exemple les structures à base de membranes et les systèmes de tenségrité de type barre-câbles. Des solutions ont ainsi été validées expérimentalement tout en révélant en parallèle leurs propriétés de pliage/dépliage.

Le secteur de l'aérospatiale portant de fait un intérêt certain pour ce type de réalisation, qui présente à la fois des caractéristiques de légèreté et de déployabilité, une collaboration étroite s'est établie avec le CNES de Toulouse (Service Mécanismes et Equipements SCAO).

Un nouveau concept d'architecture d'antenne déployable a ainsi été proposé (antenne de grande dimension, 6 à 15 m de diamètre, de type « maillée »). La conception de son ossature a reposé sur une revue de solutions pour faire appel à des mécanismes de ciseau associés à des articulations flexibles. Des modélisations numériques par éléments finis ont d'abord été développées pour simuler

le déploiement par restitution de l'énergie emmagasinée dans ces articulations lors du pliage. Un démonstrateur expérimental avec un système de compensation gravitaire a ensuite été réalisé au LMGC (« démonstrateur sol » à l'échelle 1/2 d'une antenne circulaire de 8m de diamètre à réflecteur parabolique). Des essais et mesures ont été effectués pour caractériser son comportement en statique et dynamique puis ont été comparés avec les résultats issus des simulations. La mise en forme de la surface réflectrice par un réseau de câbles a ensuite été étudié et une méthode innovante de recherche de forme permettant d'obtenir un réseau parabolique en tension uniforme a alors été proposée, puis appliquée à différentes typologies de réseaux, l'erreur de surface résultant de sa facettisation étant évaluée.

Les travaux sont actuellement poursuivis autour de l'étude d'autres types d'architecture d'antenne, ce qui devrait permettre le développement d'autres applications pour des structures à énergie interne, déployables automatiquement. Le partenariat avec le CNES s'est inscrit dans la durée et a permis d'apporter les financements nécessaires à la réalisation des prototypes et des supports d'essais.

Caractérisation géométrique et énergétique des enveloppes

Des travaux sur la caractérisation géométriques et énergétiques des enveloppes par des développements d'outils d'aide au dimensionnement de moyens de chauffage/climatisation ont été conduit en 2008 : une série d'études sur le pré-dimensionnement thermique des structures couvertes en membranes textiles a été initiée avec la Sté Ferrari (réalisation d'une interface logiciel « TexTherm »).

Ils ont ensuite concerné la caractérisation thermique d'isolants minces réflecteurs (Société CID Plastiques). Cet axe s'est poursuivi dans le cadre de l'IUT de Nîmes par la réalisation par des étudiants d'une « cabane de gardian » à vocation expérimentale et aux critères de la réglementation thermique 2012 d'un logement neuf. Cette structure de 20 m² habitable et à ossature bois, conçue avec plancher chauffant, est dotée d'un échangeur thermique de type « puits canadien » pouvant récupérer les émissions basses du plancher chauffant pour réchauffer l'air neuf en hiver, le rafraîchir en été. Une instrumentation a été installée pour en permettre la caractérisation globale, en pouvant faire varier la surface d'échange et le débit d'air. Cette structure doit ensuite être équipée, et instrumentée, d'une pompe à chaleur, de capteurs solaires thermiques, photovoltaïques, et à air, pour études, analyses des consommations selon les simulations d'utilisation.

3 Contrôle et dynamique des structures

Intervenants : J. Averseng (MCF), J.F. Dubé (PU), S.B. Amouri (thèse en cours),
Doctorants : S. Morterolle (thèse 2008-2011), A.D. Nguyen (thèse 2006-2009).

Comportement dynamique

Les travaux ont été complétés sur les propriétés d'amortissement d'une petite grille de tensegrité plane et ont confirmés qu'elles se modélisent selon une combinaison de type Rayleigh influencée par l'état d'autocontrainte. L'étude a été généralisée sur une grille plane quatre fois plus grande comprenant 6 états d'autocontraintes. Des méthodes complémentaires permettant une identification fine de chaque mode propre ont été établies et nous avons proposé un modèle d'amortissement prenant en compte l'impact de chaque classe d'élément (câbles, barres, tirants) par l'intermédiaire de coefficients spécifiques sur les contributions en masse et rigidité et en fonction de l'autocontrainte.

Lors de sa thèse, A.D. Nguyen a utilisé les outils précédemment développés au LMGC sur l'identification des efforts normaux pour déterminer l'état d'autocontrainte d'un anneau de tensegrité déployable. Il a montré une bonne concordance entre les simulations numériques du comportement de la structure chargée et les mesures expérimentales, validant ainsi les modèles proposés. Une étude complémentaire sur cette a montré la très grande sensibilité du comportement dynamique vis-à-vis des conditions d'appuis et des imperfections découlant de la conception des nœuds.

Dans le cadre de ses travaux de thèse, S. Morterolle a modélisé et identifié les modes propres de la structure principale d'un réflecteur spatial déployable. La souplesse et la fragilité du système a

imposé de mener des essais longs mettant en œuvre des capteurs sensibles à très basses fréquences pour obtenir des résultats précis. Les mesures effectuées sur les premiers modes ont montré une bonne corrélation avec les simulations numériques. Suite à un appel à projet, l'UM2 a permis à l'équipe de se doter d'un dispositif d'acquisition performant qui vient en complément des capacités de mesures existantes. Il est désormais possible de mesurer simultanément plusieurs réponses fréquentielles, de mener des analyses plus riches sous excitations de type aléatoire, tout en bénéficiant d'une meilleure dynamique de mesure (rapport signal/bruit). L'identification de l'évolution de la géométrie n'a pas été développée faute de dispositifs de mesures adaptés. Les moyens expérimentaux mutualisés au sein du laboratoire, parmi lesquels des systèmes d'analyse d'image par stéréo-corrélation, devraient nous permettre d'avancer sur ce point.

Contrôle actif dynamique et contrôle géométrique

La thèse en cours de S. Amouri a pour objectif d'étudier et de proposer de nouvelles approches pour le contrôle du comportement statique et dynamique des structures de tenségrité. Une grille plane comprenant 6 états d'autocontrainte et incluant 2 activateurs est utilisée comme modèle expérimental. Le travail repose sur une identification du comportement par calage d'un modèle rhéologique équivalent dont l'ordre permet de représenter les premiers modes significatifs de la structure. De ce modèle, on peut élaborer, par un processus de synthèse, un contrôleur destiné au pilotage d'un ou des deux activateurs, dans l'objectif de minimiser les vibrations. Diverses techniques sont étudiées, en particulier les méthodes de synthèse robuste qui permettent d'assurer la stabilité et la performance du contrôle en présence d'imperfections paramétrique sur le modèle. La dernière campagne expérimentale démontre la pertinence d'une approche de contrôle par sous domaines, pour laquelle chaque résonance est atténuée par un contrôleur dédié synthétisé à partir d'un modèle réduit à un intervalle de fréquences. De plus, l'impact combiné de tous les actionneurs est optimisé par un phasage adapté à chaque mode. Le choix d'un contrôleur sur lequel basculer se fonde sur l'analyse en continu des niveaux de vibrations et l'identification du mode dominant. Un seul capteur suffit ainsi pour contrôler les deux premiers modes en torsion et flexion d'une grille plane d'élanement 2.

En parallèle au développement expérimental, le comportement de la structure est simulé à la fois par un outil propre développé par l'équipe et sur un code de calcul industriel (Code-ASTER). Le but des simulations est d'aboutir à des modèles plus élaborés permettant d'envisager une extension de cette approche à d'autres systèmes. Des systèmes de type passerelle ou mâts sont en cours d'étude, se basant sur des activateurs intégrés en tant qu'éléments tendus (tirant actif).

Modélisation

Un outil de simulation de structures réticulées a été développé. Reposant sur un schéma d'évolution en dynamique explicite, il permet, en reproduisant le comportement temporel d'une structure, de simuler le pliage et d'étudier le comportement sous chargement.

Cet outil est utilisé pour plusieurs études portant sur l'optimisation structurales de systèmes de tenségrité fléchis. L'usage visé est une structure de type passerelle dont le mode de mise en place innovant bénéficierait des capacités de pliage des systèmes de tenségrité.

L'interface de cet outil numérique permet de visualiser et de modifier interactivement pendant le calcul certaines propriétés de la structure : topologie par ajout ou retrait d'éléments, longueurs libre des éléments, conditions limites, chargement... Cette interactivité en fait un outil de conception innovant qui facilite la conception de structures autocontraintes mécaniquement réalistes. Cet aspect est exploité actuellement pour la conception de systèmes modulaires linéaires ou courbes. La maquette d'une arche circulaire a été réalisée sur ce principe lors d'un atelier dirigé par R. Motro à l'Ecole des Beaux Arts de Lyon en janvier 2013. La conception d'une structure plus grande est en cours d'étude. Une version de cet outil a été publiée en ligne (<http://www.lmgc.univ-montp2.fr/aver-seng/JA/ToyGL.html>) afin de permettre son utilisation par d'autres équipes.

Autres développements

L'équipe a participé au projet universitaire de nano-satellite Robusta dans le cadre d'une étroite collaboration avec CNES pour développer des satellites « CubeSat » et tester le comportement de composants électroniques dans l'espace. Le rôle de notre équipe de recherche a été de tester la tenue des composants électroniques assemblés lorsqu'ils sont soumis aux accélérations de décollage du lanceur Vega. Les essais réalisés ont permis de détecter des éléments sensibles qui ont été renforcés. Le pico-satellite a été lancé par la fusée Vega en février 2012.

Dans le cadre d'une étude pour le CNES, une version spécifique de l'outil de calcul en dynamique est développée pour la conception paramétrique de structures déployables de type antenne. L'approche par dynamique explicite relaxée numériquement permet également d'implémenter des lois de comportement et de croissance complexes, ce qui permet d'étudier la sensibilité à de nombreux paramètres, notamment mécaniques, de la topologie de tissus biologiques.

4 Contrôle et dynamique des structures

Intervenants : B. Dresp-Langley (CR CNRS), Fanny Georges (post-doc 2008-2010),
Doctorants : C. Silvestri (thèse 2006-2009), Y. Boumenir (thèse 2008-2011).

Réalité virtuelle et conception

Afin de comprendre comment la complexité structurale est gérée au moyen d'interactions entre le concepteur et l'outil maquette (réel ou virtuel), une série d'études a été réalisée où deux populations d'observateur (experts vs non-experts) avaient pour tâche de redessiner de mémoire les éléments d'un système de tenségrité. L'analyse perceptive qui permet la compréhension des relations structurales entre éléments, nécessaire à la reproduction 2D ou 3D, passe par une décomposition mentale de l'objet. L'espace euclidien de conception révèle ainsi les règles structurales du maintien en état d'autocontrainte mais le mode de présentation permettant d'optimiser l'analyse et la compréhension de ces règles est à comprendre. La présentation d'une structure à des observateurs d'une représentation 2D de la structure (que les sujet devaient redessiner de mémoire), de représentations virtuelles que l'observateur pouvait générer librement (vues 3D virtuelles) et de représentation 3D réelle (maquette manipulable). L'analyse des temps pris pour reproduire la structure dans le plan et le nombre d'erreurs ont été étudiés, l'analyse des moyennes par population et de la variance ont conduit à conclure que la manipulation indirecte avec prises de vues multiples de l'image 3D projetée de structures facilite d'avantage, comparé à la manipulation directe de l'objet réel, l'analyse et la compréhension de relations structurales complexes. Ceci mène à l'hypothèse d'un processus d'apprentissage perceptif qui serait spécifique à la réalité virtuelle et qui rendrait les traces euclidiennes critiques plus rapidement accessibles à l'opérateur humain qu'un modèle réel.

Perception de l'espace, technologies d'assistance à la personne et handicap sensoriel

Ce projet a été doté d'une bourse de thèse fléchée (Y. Boumenir), réalisée en collaboration avec l'Institut des Neurosciences de Montpellier (INSERM U1051) et des collaborations ponctuelles (Faculté de Géographie de l'Université de Montpellier 3, Maison des Sciences de l'Homme de Montpellier, Association des Handicapés Visuels de France). Une série d'expériences, sur le terrain et en laboratoire, sur des populations voyants ou handicapés de la vue ont permis d'identifier des facteurs psycho-physiologiques qui influencent l'orientation dans un espace urbain réel et d'évaluer l'apport relatif des dispositifs d'assistance tactile à la navigation (recherches avec le soutien de la société ABA-plans de Genève).

Les expériences sur le terrain avec des voyants ont permis de caractériser la facilitation de la navigation en milieu naturel sur un parcours complexe par l'exploration préalable d'un plan 2D de l'itinéraire. Elles suggèrent que les indices géométriques sont bien plus importants qu'une connaissance des objets symboliques qui caractérisent le parcours. Ces recherches ont permis de conclure que le succès de la navigation dans un environnement réel complexe et non familier sur la base d'un outil

virtuel ou d'un GPS dépendait des fonctionnalités disponibles pour le déplacement dans l'environnement virtuel, de la fidélité de l'échelle virtuelle par rapport au réel, d'une combinaison efficace avec d'autres sources d'information. Une visite réelle préalable est souvent le meilleur moyen d'acquérir les informations nécessaires pour retrouver un trajet. L'expérience directe donne accès à des représentations cognitives fiables de l'échelle globale et locale du trajet et des chemins, des repères aux bifurcations critiques, des distances relatives entre repères, du temps nécessaire pour les parcourir.

Communication et gestion des risques en ingénierie pour le vivant et la société

Cet axe repose sur une récente version de la théorie du contrat de communication qui repose sur des clauses pragmatiques indispensables à une communication sincère et efficace entre individus.

Une collaboration avec des spécialistes en intelligence artificielle (LIRMM) a été développée, notamment dans le cadre du projet « Jeux de Débats » (PEPS ISC CNRS, 2010) pour étudier comment un débat sur le web organisé sous forme de jeu avec des règles influence les représentations de la problématique. Afin d'évaluer les bénéfices/coûts d'un respect/non-respect des clauses du contrat de communication, nous avons choisi comme objet d'étude une problématique qui nécessitent la prise en compte et l'évaluation d'un risque.

Nous nous sommes intéressés aux échanges verbaux entre individus afin de comprendre les effets que les interventions d'un moniteur instruit (connaissant les clauses du contrat et leurs implications) pourraient avoir sur le déroulement des réunions en ligne, notamment les rapports de force entre experts et non-experts, et sur l'évaluation et la maîtrise du risque. L'objectif était de mieux comprendre la dynamique psychologique de la mise en place de représentations individuelles ou collectives dans le cadre d'un jeu interactif qui reproduit un processus de démocratie participative, et les données issues des expériences réalisées sur la base d'un modèle de co-conception qui serviront à développer des algorithmes pour simuler le comportement d'un « agent intelligent », capable de se représenter un problème et de prendre des décisions d'une manière autonome sur la base d'un historique d'événements préalables.

Conscience, couleurs et qualia

Ce projet vise à tisser des liens entre philosophie, psychophysique de la perception et sciences des matériaux. La représentation cognitive des qualités particulières d'un objet ou événement que nous percevons au moyen d'un sens amène à la question sur la nature et la quantité d'informations nécessaires à l'élaboration des représentations des qualités d'un objet (qualia) suffisamment stables pour former le contenu d'une expérience consciente. Des signaux visuels de contraste spatial peuvent donner lieu à la perception de formes complexes et de leur profondeur et des mécanismes neuronaux à la base de telles représentations ont été suggérés, dont le rôle de la couleur.

Nous avons mis en place un programme expérimental qui vise à mieux comprendre les effets de couleurs placées sur des objets achromatiques à formes variables. Les interactions surprenantes entre formes et couleurs suggèrent des liens fonctionnels jusqu'à présent insoupçonnés entre notre cerveau et le monde physique et ont permis d'identifier une nouvelle « illusion » de contraste. Nous avons aussi développé un modèle de la prise de conscience qui explique la genèse des états de conscience sur la base de mécanismes et de concepts à l'intersection des neurosciences théoriques et de la philosophie. Il s'est élargi à la prise en compte de certaines hypothèses sur les interactions fonctionnelles entre processus non-conscients et conscients dans le cerveau et à une réflexion sur les liens fonctionnels étroits entre le temps, sa conceptualisation et sa mesure en tant que paramètre physique ou psychologique, et l'émergence de la conscience.

Bibliographie

Articles dans des revues

- [A.1] S. Amziane and **J.F. Dubé**. Global RC Structural Damage Index based on The Assessment of Local Material Damages. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6 :459–468, 2008.
- [A.2] M. Bagneris, **R. Motro**, **B. Maurin**, and N. Pauli. Structural morphology issues in free form design. *International Journal of Space Structures*, 23 :79–87, 2008.
- [A.3] A. Bouchaïr, **J. Averseng**, and A. Abidelah. Analysis of the behaviour of stainless steel bolted connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 64 :1264–1274, 2008.
- [A.4] **B. Dresp**. Dimensions of Environmental Engineering. *The Open Environmental Engineering Journal*, 1 :1–8, 2008.
- [A.5] **B. Dresp** and **J. Quirant**. Design principles and use of compression structures with tensile integrity. *Recent Patents on Engineering*, 2 :ISSN : 1872–2121, 2008.
- [A.6] **J.F. Dubé**, N. Angellier, and **B. Crosnier**. Comparison between experimental tests and numerical simulations carried out on a tensegrity minigrid. *Engineering Structures*, 30 :1905–1912, 2008.
- [A.7] K. Kébiche, **M.N. Kazi Aoual**, and **R. Motro**. Homogenizing systems in a selfstress state. *International Journal of Space Structures*, 23 :103–116, 2008. **.
- [A.8] **B. Maurin**, M. Bagneris, and **R. Motro**. Mechanisms of prestressed reticulate systems with unilateral stiffened components. *European journal of mechanics A/Solids*, 27 :61–68, 2008.
- [A.9] **B. Maurin**, **P. Cañadas**, H. Baudriller, P. Montcourrier, and N. Bettache. Mechanical model of cytoskeleton structuration during cell adhesion and spreading. *Journal of Biomechanics*, 41 :2036–2041, 2008. **.
- [A.10] **B. Maurin**, **R. Motro**, V. Raducanu, and N. Pauli. Soft tensegrity grid : conceptual design and form-finding. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 49 :77–87, 2008. **.
- [A.11] **R. Motro** and M. Bagneris. Structural morphology and conceptual design. *New Building Materials & Construction World*, 14 :214–230, 2008.
- [A.12] N. Angellier, **J.F. Dubé**, **J. Quirant**, and **B. Crosnier**. Etude de la déformée d’une grille de tensegrité pour l’identification de son niveau d’autocontrainte. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13 :1183–1202, 2009.
- [A.13] **J. Averseng** and A. Bouchaïr. Modelling and analysis of bolted stainless steel cover plate joints. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13 :443–456, 2009.
- [A.14] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, and **R. Motro**. Mécanique des systèmes précontraints appliquée à la structure du cytosquelette. *Mécanique & Industries*, 10 :285–290, 2009. **.
- [A.15] **B. Dresp**. The communication contract and its ten ground clauses. *Journal of Business Ethics*, 87 :415–436, 2009.
- [A.16] **B. Dresp** and J. Durup. A plastic temporal brain code for conscious state generation. *Neural plasticity*, 2009 :482696, 2009.

- [A.17] **J.F. Dubé, J. Quirant, F. Cevaer, A.D. Nguyen, and R. Motro.** Anneau de tensegrité pliable-dépliable. *Annales du Bâtiment et des travaux publics*, 2009 :23–29, 2009.
- [A.18] **B. Maurin, R. Motro, F. Cevaer, and V. Raducanu.** Composite profiles and membranes tensegrity panels. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13 :1061–1072, 2009.
- [A.19] **R. Motro.** Structural morphology of tensegrity systems. *Asian Journal of Civil Engineering*, 10 :1–19, 2009.
- [A.20] **J. Quirant.** Effondrement des tours du WTC : Bilan des études scientifiques. *Annales du Bâtiment et des travaux publics*, 2009 :27–35, 2009.
- [A.21] Y. Boumenir, F. Georges, J. Valentin, G. Rebillard, and **B. Dresp.** Wayfinding through an unfamiliar environment. *Perceptual and Motor Skills*, 111 :829–47, 2010.
- [A.22] **B. Maurin, P. Cañadas, and R. Motro.** Modélisation en mécanique cellulaire par systèmes de tensegrité. *Techniques de l’Ingenieur*, page RE 117, 2010. **.
- [A.23] C. Silvestri, **R. Motro, B. Maurin, and B. Dresp.** Learning to understand the 3D structure of complex object morphologies through interaction with virtual and real-world data. *Design Studies*, 31 :363–381, 2010.
- [A.24] Y. Boumenir, G. Rebillard, and **B. Dresp.** Brief visual exposure to spatial layout and navigation from memory through a complex urban environment. *Perception*, 40 :82, 2011.
- [A.25] **B. Dresp.** Book Review. *DIVI-Deutscher Ärzteverlag*, 4 :40, 2011.
- [A.26] **R. Motro.** Structural Morphology of Tensegrity Systems. *Meccanica*, 46 :27–40, 2011.
- [A.27] **S. Nezamabadi, H. Zahrouni, and J. Yvonnet.** Solving hyperelastic material problems by asymptotic numerical method. *Computational Mechanics*, 47 :77–92, 2011.
- [A.28] A. D. Nguyen, **J. Quirant, F. Cevaer, and J.F. Dubé.** Study and construction of a pentagon-based tensegrity ring. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15 :849–868, 2011.
- [A.29] **J. Quirant, F. Cevaer, S. Morterolle, B. Maurin, and J.F. Dubé.** Conceptual design and analysis of a deployable structure with flexible joints. *Journal of Aerospace Engineering*, 24 :277–284, 2011.
- [A.30] **J. Averseng, J. Quirant, and J.F. Dubé.** Interactive dynamic design and analysis of tensegrity systems. *International Journal of Space Structures*, 27 :97–105, 2012.
- [A.31] **F. Cevaer, J. Quirant, and J.-F. Dubé.** Mechanical behaviour in compression of a foldable tensegrity ring : parametric study and rheological model. *International Journal of Space Structures*, 27 :107–115, 2012.
- [A.32] **B. Dresp.** Why the brain knows more than we do : non-conscious représentations and their role in the construction of conscious experience. *Brain Sciences*, 2 :1–21, 2012.
- [A.33] **B. Dresp.** Responsibly managing risks to the environment : stakeholders and their communication contract. *Open Environmental Engineering Journal*, 5 :19–26, 2012.
- [A.34] **B. Dresp** and J. Durup. Does consciousness exist independently of present time and present time independently of consciousness? *Open Journal of Philosophy*, 2 :45–49, 2012.
- [A.35] **B. Dresp** and A. Reeves. Chevreul’s laws of contrast and color revisited. *Perception*, 41 :62, 2012.
- [A.36] **B. Dresp** and A. Reeves. Simultaneous brightness and apparent depth from true colors on grey : Chevreul revisited. *Seeing & Perceiving*, 25 :597–618, 2012.
- [A.37] F. Gioia, **D. Dureisseix, R. Motro, and B. Maurin.** Design and analysis of a foldable / unfoldable corrugated architectural curved envelop. *Journal of Mechanical Design*, 134 :031003, 2012.
- [A.38] S. Morterolle, **B. Maurin, J. Quirant, and C. Dupuy.** Numerical form-finding of geotensoid tension truss for mesh reflector. *Acta Astronautica*, 76 :154–163, 2012.

- [A.39] **S. Nezamabadi**, H. Zahrouni, J. Yvonnet, and M. Potier-Ferry. Multiscale analysis of instabilities in heterogeneous materials using ANM and multilevel FEM. *European Journal of Computational Mechanics*, 22 :280–289, 2012.
- [A.40] L. Rhode-Barbarigos, N. Bel Hadj Ali, **R. Motro**, and I. F. Smith. Design aspects of a deployable tensegrity-hollow-rope footbridge. *International Journal of Space Structures*, 27 :107–115, 2012.
- [A.41] L. Rhode-Barbarigos, C. Schulin, N. Bel Hadj Ali, **R. Motro**, and I. F. Smith. Mechanism-based approach for the deployment of a tensegrity-ring module. *Journal of Structural Engineering*, 138 :539–548, 2012.
- [A.42] N. Angellier, **J.F. Dubé**, **J. Quirant**, and **B. Crosnier**. Behaviour of a double layer tensegrity grid under static loading : identification of self-stress level. *Journal of Structural Engineering*, 139 :1075–1081, 2013.
- [A.43] K. Attipou, **S. Nezamabadi**, E. M. Daya, and H. Zahrouni. A multiscale approach for the vibration analysis of heterogeneous materials : Application to passive damping. *Journal of Sound and Vibration*, 332 :725–739, 2013.
- [A.44] Y. Chélin, K. Azzag, **P. Cañadas**, **J. Averseng**, S. Baghdiguian, and **B. Maurin**. Simulation of Cellular Packing in Non-Proliferative Epithelia. *Journal of Biomechanics*, 46 :1075–1080, 2013. **.
- [A.45] O. Mezghanni, **J. Averseng**, A. Bouchaïr, and H. Smaoui. Behavior of beam web panel under opposite patch loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 83 :51–61, 2013.
- [A.46] B. Schwaller, D. Ensminger, J. Ragot, and **B. Dresp**. State estimates for a class of non-linear systems. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 23 :383–394, 2013.

Participations à un ouvrage

- [B.1] **B. Dresp** and K. Langley. The biological significance of color. In P Matikas (Eds) D Skusevich, editor, *Color perception : Physiology, processes and analysis*, pages 110–115. Nova Publishers New York, 2009.
- [B.2] **B. Dresp** and K. Langley. *The importance of color perception to animals and man*. Nova Publishers New York, 2010.
- [B.3] **J. Quirant**. *11-Septembre et Théories du Complot ou le conspirationnisme à l'épreuve de la science*. Book-e-book, 2010.
- [B.4] **J. Quirant**. *La farce enjôleuse du 11-Septembre*. Books-on-Demand, 2010.
- [B.5] Y. Boumenir, **B. Dresp**, and G. Rebillard. Short-term Memory Representation Of A Complex And Non-familiar Environment After Brief Exposure. In WebMedCentral, editor, *WebMedCentral/BRAIN, 2, WMC001523*, page WMC001523. WebMedCentral, 2011.
- [B.6] **R. Motro**. Tension Structures in "Fifty years of progress for shell and spatial Structures". In *IASS Jubilee Book*, page 14 p. Multi-Sciences, 2011.
- [B.7] **R. Motro**. Topics in Spatial Structures in "Fifty years of progress for shell and spatial Structures". In *IASS Jubilee Book*, page 8 p. Multi-Sciences, 2011.
- [B.8] **R. Motro**. Fifty years of progress for shell and spatial Structures. In *IASS Jubilee Book*, page 14 p. Multi-Sciences, 2011.
- [B.9] **B. Dresp**. *A communication contract for responsible action in a world of risks*. Lambert Academic Publishing, 2013.
- [B.10] **B. Dresp** and A. Reeves. Color and figure-ground : from signals to qualia. In S Magnussen (Eds) A Geremek, MW Greenlee, editor, *Perception beyond Gestalt : Progress in vision research*, pages 159–171. Psychology Press - Taylor & Francis, 2013.
- [B.11] **B. Maurin** and **R. Motro**. Textile Architecture. In *Matériaux Composites Souples en Architecture, Construction et Intérieurs*, page 13 p. Birkhauser, 2013.

- [B.12] **R. Motro**. *Matériaux Composites Souples en Architecture, Construction et Intérieurs*. Birkhäuser, 2013.
- [B.13] **R. Motro** and B. Doriez. Détails de mise en œuvre des Textiles Techniques. In *Matériaux Composites Souples en Architecture, Construction et Intérieurs*, page 16 p. Birkhäuser, 2013.

Communications avec actes dans des colloques

- [C1.1] **J. Averseng** and A. Bouchaïr. Finite elements modelling and analysis of stainless steel bearing type bolted joints. In *Eurosteel 2008*, pages 687–692, Autriche, 2008.
- [C1.2] B. Schwaller, D. Ensminger, J. Ragot, and **B. Dresp**. State estimates for non-linear SISO systems. In *16th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'08*, pages 1464–1471, Ajaccio, France, 2008.
- [C1.3] N. Angellier, J. Jaen, **J.F. Dubé**, and **B. Crosnier**. Etude du comportement dynamique d'une structure de tenségrité en fonction des niveaux d'autocontrainte. In *Actes du 9ème Congrès de Mécanique*, pages CD–Rom, Marrakech, Maroc, 2009.
- [C1.4] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, and **R. Motro**. Mécanique des systèmes précontraints appliquée à la structure du cytosquelette. In *Congrès Français de Mécanique*, page xxx, Marseille, France, 2009.
- [C1.5] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, and **R. Motro**. Prestressed system mechanics applied to the cytoskeleton structure. In *Mécanique et Industries*, volume 10, pages 285–290, Marseille, France, 2009.
- [C1.6] **J.F. Dubé**, **B. Crosnier**, and N. Angellier. Caractéristiques dynamiques d'une structure de tenségrité en fonction de son niveau d'autocontrainte. In *Actes du 19ème Congrès Français de Mécanique*, pages CD–Rom, 6p., Marseille, France, 2009.
- [C1.7] **R. Motro**, **J. Quirant**, A. D. Nguyen, and **B. Maurin**. Foldable tensegrity rings : from conceptual design to physical and numerical models. In *9th APCS congress*, pages CD–Rom, Nagoya, Japon, 2009.
- [C1.8] A. D. Nguyen. Etude du comportement mécanique et du pliage d'un anneau de tenségrité à base pentagonale. In *27ème Rencontres AUGC*, pages –, Saint Malo, France, 2009.
- [C1.9] A. D. Nguyen, **J. Quirant**, **F. Cevaer**, and **J.F. Dubé**. Comportement d'un anneau de tenségrité. In *Actes du 19ème Congrès Français de Mécanique*, page Communication n° 205, Marseille, France, 2009.
- [C1.10] **J. Quirant**. Effondrement des tours du WTC : les conclusions scientifiques... In *27èmes rencontres de l'AUGC "Génie civil et développement durable"*, pages 4–21, Saint Malo, France, 2009.
- [C1.11] L. Rhode-Barbarigos, N. Bel Hadj Ali, **R. Motro**, and F.C. Smith Ian. Tensegrity modules for pedestrian bridges. In *IASS Symposium 2009, Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial*, pages CD–Rom, Valencia, Espagne, 2009.
- [C1.12] B. Schwaller, D. Ensminger, J. Ragot, and **B. Dresp**. Estimation d'état pour systèmes non linéaires à une entrée une sortie. In *15ème Colloque National de la Recherche en IUT, CNRIUT 2009*, page CDROM, Lille, France, 2009.
- [C1.13] E. Bourreau, A. Garrido, J. Sallantin, and **B. Dresp**. From Ability to Capability. In *ECAP'10 : 8th Conference on Computing and Philosophy*, pages 149–155, München, Allemagne, 2010.
- [C1.14] **F. Cevaer**, **J. Quirant**, N. Angellier, and **J.F. Dubé**. Mesure de la tension de câbles à rigidité de flexion non nulle à l'aide d'un tensiomètre. In *XXVIII èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil "Ouvrages en service et développement durable"*, page p. 225, La Bourboule, France, 2010.
- [C1.15] **J. Averseng**, **J. Quirant**, and J.-F. Dubé. Interactive design and dynamic analysis of tensegrity systems. In *Actes du congrès*, page Id 269, Come, Italie, 2011.

- [C1.16] **F. Cevaer, J. Quirant**, and J.-F. Dubé. Mechanical behaviour of a foldable tensegrity ring : parametric study. In *Actes du Congrès*, page Id 258, Come, Italie, 2011.
- [C1.17] **D. Dureisseix**, F. Gioia, **R. Motro**, and **B. Maurin**. Conception d'une Enveloppe Plissée Pliable-Dépliable. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.18] F. Gioia, **D. Dureisseix**, V. Raducanu, **B. Maurin**, and **R. Motro**. Conceptual Design, Realization and Experimentation on a Foldable / unfoldable Corrugated Curved Envelop. In *Proceedings CSMA*, page 8 p., Giens, France, 2011.
- [C1.19] S. Morterolle, **B. Maurin**, and **J. Quirant**. Recherche de Forme d'un Réflecteur Parabolique " Géotensoid ". In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.20] **R. Motro**. Art and Structural Engineering-Art of Structural Engineering. In *Structural Engineers World Congress*, page 8 p., Côme, Italie, 2011.
- [C1.21] **R. Motro** and **B. Maurin**. Bernard Laffaille, Nicolas Esquillan, Two French Pioneers. In *Proceedings IASS 2011*, page 8 p., Londres, Royaume-Uni, 2011.
- [C1.22] L. Rhode-Barbarigos, N. Bel Hadj Ali, **R. Motro**, and I. F. Smith. Deployment of a pentagonal hollow-rope tensegrity module. In *Proceedings IASS 2011*, page 8 p., Londres, Royaume-Uni, 2011.
- [C1.23] L. Rhode-Barbarigos, N. Bel Hadj Ali, **R. Motro**, and I. F. Smith. Deployment aspects of a tensegrity-ring pedestrian bridge. In *SEWC 2011 Proceedings*, page 8 p., Côme, Italie, 2011.
- [C1.24] L. Rhode-Barbarigos, C. Schulin, N. Bel Hadj Ali, **R. Motro**, and I. F. Smith. Deployment analysis of a pentagonal tensegrity-ring module. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.25] **J. Averseng** and **J.F. Dubé**. Design, Analysis and Self Stress Setting of a Lightweight Deployable Tensegrity Modular Structure. In *Procedia Engineering*, pages 14–19, Slovaquie, 2012.
- [C1.26] Y. Chélin, K. Azzag, **P. Cañadas**, S. Baghidiguian, and **B. Maurin**. A mechanical and numerical approach applied to epithelium topology and development. In *Journal of Biomechanics - Special Issue*, page 1, Portugal, 2012.
- [C1.27] F. Gioia, **D. Dureisseix**, V. Raducanu, **B. Maurin**, and **R. Motro**. Conceptual design, realization and experimentation on a foldable / unfoldable corrugated curved envelop. In *Proceedings of the IASS Symposium - IASS-APCS 2012*, pages 7 p. on CD-ROM, Seoul, Corée, République De, 2012.
- [C1.28] **R. Motro**. Tensegrity : from Art to Structural Engineering. In *2012 IASS-APCS Symposium, Abstract Book*, page 14 p., Séoul, Corée, République De, 2012.
- [C1.29] L. Rhode-Barbarigos, **R. Motro**, and I. F. Smith. A transformable tensegrity-ring footbridge. In *2012 IASS-APCS Symposium, Abstract Book*, page 8 p., Séoul, Corée, République De, 2012.
- [C1.30] Y. Chélin, **J. Averseng**, **P. Cañadas**, and **B. Maurin**. Divided media based simulations of tissue morphogenesis. In *Actes du 38ème Congrès de la Société de Biomécanique*, page 2 p., Marseille, France, 2013.
- [C1.31] Y. Chélin, **J. Averseng**, **P. Cañadas**, and **B. Maurin**. Modèle granulaire de morphogénèse tissulaire. In *Actes du CSMA 2013*, pages 8 p., Clé USB, Giens, France, 2013.

Communications sans actes dans des colloques

- [C2.1] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, R. Peyroux, and **R. Motro**. Modélisation cellulaire par systèmes précontraints. In *Journées du GDR Mécanotransduction : déterminants et implications*, Marseille, France, 2009.
- [C2.2] **R. Motro**. Structural morphology of tensegrity and foldability. In *Institut de Robotica I informatica industrial*, Barcelone, Espagne, 2009.

- [C2.3] **R. Motro**. Tensegrity : a breakthrough concept. In *Conférence de Presse organisée par Chanel, Research and Technology*, Paris, France, 2009.
- [C2.4] **R. Motro**. Structural morphology and free form design. In *Séminaire de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, Suisse, 2009.
- [C2.5] Y. Chélin, **P. Cañadas**, C. André, and **B. Maurin**. Cytoskeleton numerical morphogenesis in cell adhesion. In *The 4th European Cell Mechanics Meeting (CellMech 2011)*, Amsterdam, Pays-Bas, 2011.
- [C2.6] **R. Motro**. Tensegrity : from Art to Structural Engineering. In *Forum on Steel and Composite Structures for large scale buildings*, Shangai, Chine, 2011.
- [C2.7] Y. Chélin. Modèle mécanique de développement de tissus biologiques. In *Doctiss 2012*, Montpellier, France, 2013.
- [C2.8] **S. Nezamabadi**, **F. Radjai**, **J. Averseng**, and **J.Y. Deleenne**. A Numerical Strategy for the Compaction of Soft Particle Systems beyond Jamming Transition. In *Dense flows of soft objects : bringing together the cases of bubbles, droplets and cells*, Grenoble, France, 2013.

Conférences invitées

- [I.1] J. Aanhaanen, J.Y. Demuyter, M. Bagneris, C. Silvestri, and **R. Motro**. Collective paper with students, Introducing pascalian forms to large scale physical models. In *IASS 2008*, Acapulco, Mexique, 2008.
- [I.2] M. Bagneris, **B. Maurin**, and **R. Motro**. Toward a non standard tensegrity. In *6th International Seminar on Structural Morphology, IASS 2008*, Acapulco, Mexique, 2008.
- [I.3] M. Bagneris, **B. Maurin**, N. Pauli, and **R. Motro**. Structural curves on non standard surfaces. In *IASS 2008*, Acapulco, Mexique, 2008.
- [I.4] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, and H. Baudriller. Initial stress system modelling applied to adherent cell mechanics. In *Human Biomechanics 2008*, Prague, Tchèque, République, 2008.
- [I.5] **B. Maurin**, **P. Cañadas**, and **R. Motro**. Tensegrity architecture calculation of the cellular cytoskeleton. In *IASS-IACM2008, 6th ICCSSS*, Ithaca, New-York, États-Unis, 2008.
- [I.6] **B. Maurin**, **R. Motro**, **F. Cevaer**, and V. Raducanu. Composites profiles and membrane tensegrity panels. In *Orgagec'08 Conférence*, page CDrom p50, Paris, France, 2008.
- [I.7] **R. Motro**. La conception des structures légères architecturales : continuités et ruptures. In *1er Congrès francophone d'histoire de la construction*, Paris, France, 2008.
- [I.8] **R. Motro** and V. Raducanu. "Who is the designer?". In *6th International Seminar on Structural Morphology, IASS 2008*, Acapulco, Mexique, 2008.
- [I.9] C. Silvestri and **R. Motro**. Non-standard design : the morphogenesis of continuum. In *6th International Seminar on Structural Morphology, IASS 2008*, Acapulco, Mexique, 2008.
- [I.10] **R. Motro**. Tensegrity : from Art to Structural Engineering. In *Séminaire Tongji University*, Shangai, Chine, 2011.
- [I.11] **R. Motro**. Tensegrity Systems : from the simplex to the foldable tensegrity ring. In *Séminaire Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, Lausanne, Suisse, 2011.
- [I.12] **R. Motro**. Tensegrity Systems : from the simplex to the foldable tensegrity ring. In *Séminaire Civil and Environmental Engineering Department*, Princeton, États-Unis, 2011.
- [I.13] **R. Motro**. Black Mountain College. In *Conférences du Musée d'Art Contemporain de Lyon*, Lyon, France, 2012.
- [I.14] **R. Motro**. Introduction à la Tenségrité. In *Ecole des Beaux Arts de Lyon*, Lyon, France, 2012.
- [I.15] **R. Motro**. Innovative Spatial Structures - Applications. In *Tongji Design Group*, Shangai, Chine, 2012.
- [I.16] **R. Motro**. Innovative Spatial Structures - Analysis and Design aspects. In *Shanghai Xiandai Design Group Conference*, Shangai, Chine, 2012.

- [I.17] **R. Motro.** Tensegrity Structures in Architecture. In *Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, Pologne, 2013.

Thèses

- [T.1] N. Angellier. *Etat d'autocontrainte des grilles de tensegrité. Vers l'identification sous sollicitation naturelle.* PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, July 2008.
- [T.2] M. Bagneris. *Contribution à la conception et à la réalisation des morphologies non-standard : les formes pascaliennes comme outil.* PhD thesis, Université Montpellier 2, June 2009.
- [T.3] A.D. Nguyen. *Etude du comportement mécanique et du pliage d'un anneau de tensegrité à base pentagonale.* PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2009.
- [T.4] C. Silvestri. *Perception et Conception en Architecture Non Standard.* PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, June 2009.
- [T.5] Y. Boumenir. *Navigation spatiale en milieu urbain réel ou virtuel : performances et traitement multisensoriel de l'information spatiale chez les voyants, malvoyants et aveugles congénitaux ou tardifs.* PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, September 2011.
- [T.6] S. Morterolle. *Étude de structures légères déployables pour applications spatiales.* PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, October 2011.
- [T.7] Y. Chélin. *Développement d'un modèle mécanique et numérique de morphogenèse de tissus épithéliaux.* PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2012.

Autres publications

- [W.1] **J. Quirant.** 11 Septembre 2001 : Les conclusions scientifiques, 2009.
- [W.2] **J. Quirant.** Mythes et Légendes sur le 11 Septembre, 2010.
- [W.3] **J. Quirant.** 11 Septembre 2001 : Conclusions scientifiques et théories du complot, 2010.
- [W.4] **J. Quirant.** Attentats du 11 septembre 2001 : l'ingénierie forensique à rude épreuve, 2011.
- [W.5] **J. Quirant.** Sécurité dans la construction, de l'empirisme à l'ingénierie forensique, 2012.
- [W.6] **R. Motro.** L'Etat de Tensegrité, 2013.
- [W.7] **F. Cevaer, J. Quirant,** and J.-F. Dubé. Modélisation analytique du comportement en compression d'un anneau de tensegrité à base pentagonale.

3 Couplages en Géomécanique et Biomécanique (CGB)

Intervenants : D. Ambard (MCF), J.-C. Bénet (PR émérite), P. Cañadas (MCF), F. Cherblanc (PR), B. Cousin (MCF HDR), F. Jourdan (PR), S. Le Floc'h (MCF), J. Lewandowska (PR), P. Royer (CR CNRS)

Doctorants : S. Ouoba (Bourse MAE, 2006-2009), A. Ramirez-Martinez (Bourse Mexicaine, 2008-2011), D. Ratovoson (MRT, 2008-2011), M. Sanchez (CIFRE, 2009-2012), A. Baldit (MRT, 2010-2013), M. Kebre (Bourse MAE, 2010-soutenance prévue en 2014), B. Bonnet (CHU Montpellier, 2012-2015), B. Lafon (CIFRE, 01/2012-2015), E. Tiendrebeogo (Bourse Burkina Faso, 2012-2015), K. Wojtacki (MRT, 2012-2015)

L'équipe « Couplages en Géomécanique et Biomécanique » est une jeune équipe créée lors du renouvellement du dernier contrat quadriennal. L'ambition était de développer des approches de modélisation théorique et numérique des phénomènes couplés communes aux applications associées aux géo-matériaux et aux tissus biologiques humains. Un défi était de faire émerger des activités de recherche en biomécanique et de les porter à maturité (autonomie scientifique et financière). Ainsi, le contour thématique de l'équipe CGB s'articule autour de 3 axes. Le 1^{er} axe s'intéresse à la géomécanique et en particulier aux applications environnementales liées à la gestion des ressources en eau et le stockage du CO_2 . Le 2^{ème} axe aborde la modélisation des tissus humains avec l'objectif de coupler des problématiques scientifiques et cliniques. En amont de ces deux axes liés aux applications, le 3^{ème} axe vise au développement des outils théoriques et numériques pour la modélisation multi-échelles des phénomènes couplés en milieux poreux.

Concernant les ressources humaines, ce quadriennal a été l'occasion de recruter en Septembre 2012 un nouveau Maître de Conférences (S. Le Floc'h) au département GMP de l'IUT de Nîmes. Son projet d'intégration dans l'équipe est centré sur la biomécanique et en particulier sur la modélisation de la croissance des tissus biologiques. De plus, 10 doctorants ont débuté ou soutenu leur thèse pendant ce quadriennal. Les financements ont été assurés en grande partie (8 bourses sur 10) par des allocations diverses (CIFRE, MAE, 2ie, Coopération Franco-Mexicaine, CHU Montpellier) soulignant ainsi la forte attractivité de l'équipe et sa capacité à trouver d'autres sources de financement que les allocations MRT.

Du point de vue des moyens techniques, cette période a permis la création d'une salle d'expérimentation homologuée pour travailler sur les tissus humains. Dans ce cadre, les recommandations en vigueur requièrent un confinement L2 (Cahiers de prévention - Risques biologiques - CNRS). Fortement soutenue par le laboratoire, l'adaptation d'une salle à ce niveau de confinement s'est traduite par divers travaux d'aménagement (sol, murs, plomberie, climatisation, mobiliers), l'installation de paillasse en glace émaillée, l'acquisition d'un congélateur dédiée à la conservation des tissus humains (-86° C) et d'un poste de sécurité microbiologique de classe II. Récemment terminée, cette salle va nous permettre de profiter des différentes collaborations établies avec les CHU afin de disposer de matériaux issus d'opérations chirurgicales sur des patients.

Les ressources financières de l'équipe se sont diversifiées au cours de ce quadriennal. Plusieurs contrats de recherche sont venus renforcer les partenariats industriels (Philips, Ansys, Expertise Radiologie, Cerma-Vein) permettant le financement de 2 doctorats sur des bourses CIFRE. La fondation Yves Cotrel (Institut de France) soutient financièrement une étude clinique en partenariat avec le CHU. Un PEPS a permis de confirmer des collaborations avec l'université de Créteil. Les différentes

collaborations ont conduit l'équipe à déposer 4 demandes de financement auprès de l'ANR en 2013, dont 1 en tant que porteur de projet.

L'équipe CGB participe ainsi à 2 nouveaux projets de recherche qui ont ou vont démarré(er) en 2013. Le 1^{er} s'intéresse au « Rôle des contraintes hygro-mécaniques dans la dégradation des pierres calcaires, caractérisation expérimentale et modélisation numérique ». Il est financé par le Ministère de la Culture dans le cadre des appels à projets PNRCC en collaboration avec le CICRP de Marseille (Centre Interdisciplinaire de Conservation et de Restauration du Patrimoine). Le 2nd projet est financé par l'ANR CONTINT (Contenus Numériques et Interactions) et porte sur la « Modélisation numérique et gestion de données pour la conservation des structures maçonnées » (MONUMENTUM).

1 Axe 1 : Géomécanique environnementale

Intervenants : J.-C. Bénet, F. Cherblanc, B. Cousin, **J. Lewandowska**, P. Royer

Doctorants : M. Kebre, S. Ouoba, A. Ramirez-Martinez, E. Tiendrebeogo, K. Wojtacki

Dans le cadre de cette thématique, nous nous intéressons à la modélisation des couplages chimie-transferts-mécanique intervenant dans les problèmes concernant les questions géo-environnementales d'actualité telles que la gestion des ressources en eau ou le changement climatique.

1.1 Gestion des ressources en eau et Agronomie

Un des objectifs de cet axe est la modélisation des transferts en milieux complexes et la prise en compte des phénomènes physico-chimiques présents aussi bien dans les sols et que dans les produits agro-alimentaires. Cette volonté a nécessité de repenser la modélisation des milieux hétérogènes en introduisant des grandeurs thermodynamiques plus générales que celles utilisées en science du sol. En particulier, le potentiel chimique a été utilisé pour caractériser l'état thermodynamique d'un constituant ou d'une phase pure présent au sein d'un milieu poreux. Cette grandeur présente l'avantage d'être le moteur des transferts de matière et des phénomènes physico-chimiques, facilitant ainsi la formulation des couplages. Une réflexion sur la mesure du potentiel chimique nous a permis de proposer une modélisation unifiée de l'état thermodynamique de l'eau dans des milieux aussi divers que les sols, gels, bois, caoutchouc naturel, milieux alimentaires et agro-alimentaires, ainsi qu'une méthodologie pour la caractérisation expérimentale du potentiel chimique [A.27].

Les techniques expérimentales standards n'étant applicable qu'à la caractérisation de l'eau, une nouvelle méthode a été développée pour mesurer le potentiel chimique d'un composé volatil quelconque adsorbé dans un sol [T.3, A.20, A.19]. Des études sur l'heptane et le TCE ont démontré les potentialités de cette technique qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet national [W.3]. Les droits de ce brevet ont été acquis par une entreprise régional (TMI-Orion) avec laquelle nous travaillons au développement d'un premier modèle commercialisable. Une demande d'extension du brevet aux Etats-Unis est en cours.

Ce dispositif à ensuite été étendu au cas d'une solution dans un sol (TCE dissout dans l'eau) afin de caractériser l'équilibre thermodynamique des mélanges gazeux. Les résultats expérimentaux montrent que la loi de Henry reste valable dans le domaine hygroscopique mais que le coefficient de Henry décroît avec les effets hygroscopiques [T.3]. La caractérisation de l'équilibre thermodynamique d'un composé organique volatil dans un sol a permis de mener à terme une étude sur la dépollution des sols par ventilation dans le cas d'une pollution par l'heptane [A.36]. Un modèle tenant compte de la vitesse et de la teneur en heptane de l'air a été proposé. Une bonne concordance a été obtenue lors de la confrontation de ce modèle aux résultats expérimentaux. Un coefficient d'efficacité a ainsi pu être défini, fonction de la teneur en heptane de la phase gazeuse et paramétré par la vitesse de l'air.

Au delà des équilibres thermodynamiques, les cinétiques de changement de phase traduisent la dynamique du retour à l'équilibre. Les dépendances des cinétiques d'évaporation et de condensation sur la teneur en eau, la température, la texture du sol ont pu être mises en évidence et caractérisées [A.6, A.10, A.15]. Ces travaux sont développés dans le cadre d'une collaboration avec les universités

de Ouagadougou et Bobo-Dioulasso (Burkina-Faso) démarrée en 2003. Ce projet s'intéresse à la modélisation des transferts d'eau dans les sols arides. En effet, les approches proposées jusqu'alors ne permettent pas de décrire correctement les processus, ni de les confronter de manière satisfaisante à des résultats expérimentaux. L'objectif est de réinvestir cette thématique en se focalisant sur les régimes pendulaire et hygroscopique où l'eau est partiellement adsorbée sur le squelette solide.

Le modèle proposé donne un rôle central au phénomène de changement de phase en conservant la possibilité d'un non-équilibre liquide/gaz. Cette approche a permis de reproduire correctement les profils expérimentaux de teneur en eau dans des colonnes de sols exposées à des conditions thermo-hygro-métriques régulées [T.2, A.37, C2.3]. Cette validation a conduit à la remise en cause de l'hypothèse d'équilibre local sur laquelle s'appuie la grande majorité des études sur les échanges sol/atmosphère. Les travaux expérimentaux menés à l'Université de Ouagadougou ont conduit à compléter les connaissances actuelles sur les phénomènes de transfert d'eau lorsque celle-ci s'écoule sous forme de film adsorbée sur le squelette solide [C1.20]. L'ensemble de ces données permet d'envisager des études expérimentales à plus grande échelle avec la réalisation d'un site instrumenté à Bobo-Dioulasso. L'objectif final est l'analyse des procédés traditionnels de préservation des ressources en eau avec une approche de modélisation théorique et numérique.

Afin de développer notre activité vers les problématiques liées à l'agro-alimentaire, des travaux ont été menés en collaboration avec le CIRAD sur la recherche des conditions de séchage de grains de café pour éviter le développement de micro-organismes produisant de l'Ochratoxine A, soupçonnée d'être cancérigène. Les micro-organismes se développent lorsque l'eau en surface du grain est disponible, c'est à dire si son activité est comprise entre 0.8 et 1. L'objectif était donc de modéliser les transferts en phase liquide à l'échelle du grain et d'optimiser les scénarios de séchage afin de minimiser les risques de contamination. La structure interne du grain de café présente des discontinuités très marquées : albumen, pellicule argentée, parche. Les structures de ces différentes parties ont été analysées et leurs propriétés physiques caractérisées (isotherme de désorption, coefficient de transfert en phase liquide et gazeuse) [A.38, C1.9]. Ceci a permis de simuler les transferts d'eau à la surface du grain et de formuler des préconisations sur le procédé de séchage [T.4].

Dans la continuité de ce travail, une thèse a démarré en 2012 en alternance entre les universités de Montpellier et Ouagadougou. Le sujet porte sur la modélisation numérique des phénomènes couplés thermique et mécanique au cours d'une opération de séchage de produits agro-alimentaires fortement déformables. L'objectif est l'optimisation des paramètres procédés dans le but d'améliorer la qualité du produit final. Ce travail s'appuie sur la plateforme logicielle LMGC90 et surtout sur les récents développements du code exposés dans l'axe 3.

1.2 Erosion interne et stockage géologique du CO_2

Cet axe de travail vise à la prédiction du comportement mécanique des géomatériaux suite à une dégradation/endommagement de nature chimique, physique ou biologique. La modélisation est basée sur une approche multi-échelles en appliquant la méthode d'homogénéisation périodique et par la prise en compte de la modification de la microstructure du matériau solide induite par les processus physico-chimiques (microstructure en évolution). Les résultats les plus marquants sont synthétisés ci-dessous.

Une première problématique concerne le stockage géologique du CO_2 dans les formations salines profondes et plus spécifiquement la modélisation du couplage entre la dissolution de la roche et les effets géomécaniques associés. Un des défis du projet CCS (Carbone Capture and Storage) est la modélisation des effets à long terme (> 1000 ans) quand le CO_2 dissous dans l'eau saline (environnement acide) commence à attaquer la roche. Afin d'aborder ce problème une collaboration avec le Laboratoire Géosciences Montpellier (Equipe Transferts en Milieux Poreux), qui possède un banc expérimental spécifique ICAR, a été développée. Deux thèses en collaboration avec Géosciences ont débutées en septembre 2012 (K. Wojtacki au LMGC et F. Gjetvaj à Géosciences). Le premier modèle analytique couplé chimie/mécanique a été développé [?]. Dans le cadre de la thèse de K. Wojtacki, nous avons élaboré un modèle incrémental et une procédure numérique permettant de calculer la déformation progressive de l'aquifère, basée sur l'analyse 3D de l'échantillon de la roche (tomographie aux rayons X) et de son érosion interne.

Un deuxième aspect porte sur la modélisation du couplage hydro-mécanique dans un matériau endommagé, contenant des fractures ou/et des cavités isolés. Le modèle poro-mécanique phénoménologique de Biot a été revisité par la méthode d'homogénéisation, afin de prendre en compte l'endommagement du matériau poreux. Il a été démontré que dans ce cas le modèle macroscopique possède la même structure formelle que le modèle Biot classique mais des modifications significatives de tous les paramètres macroscopiques (tenseur de rigidité, tenseur de perméabilité, tenseur et module du couplage écoulement-déformation) sont nécessaires. Les calculs numériques à deux échelles en utilisant la méthode des éléments finis ont montré l'importance de cette correction pour les applications pratiques [A.29].

Dans le cadre de l'appel à projets FP7-ENERGY 2011, un projet européen LOTECS « Long Term Effects of CO2 sequestration » a été déposé en collaboration avec 10 institutions européens. L'équipe CGB était responsable de Work Package 4 : « Understanding processes/phenomena in the far field in the long time scale ».

2 Axe 2 : Tissus humains

Intervenants : D. Ambard, F. Cherblanc, P. Cañadas, **F. Jourdan**, S. Le Floc'h, P. Royer

Doctorants : A. Baldit, B. Bonnet, B. Lafon, D. Ratovoson, M. Sanchez

Le 2^{ème} axe d'application s'intéresse au comportement et fonctionnement des tissus biologiques humains (os, cartilage, peau, paroi vasculaire, ...). Les travaux que nous avons réalisés dans cet axe s'articulent autour de :

- la caractérisation expérimentale thermo-mécanique des tissus biologiques,
- la modélisation mécanique multi-échelles,
- l'étude des couplages entre le comportement mécanique et les transferts,
- l'intégration de contraintes multi-physiques (mécanique, hydraulique, électrique, chimique).

De plus, certaines opportunités ont permis d'entamer des travaux non prévus initialement. En outre, l'équipe participe depuis leur création à différents Groupes de Recherche CNRS (GDR 3162 « Mécanotransduction », GDR 3070 « Physique de la cellule au tissu » et GDR 3570 « Mécanique des matériaux et fluides biologiques ») ainsi qu'à un groupe de travail international (European Cell Mechanics Group, qui organise un colloque international en biomécanique cellulaire tous les 2 ans).

2.1 Etude thermomécanique des tissus

En septembre 2008 a débuté la thèse de D. Ratovoson sur l'étude des propriétés thermo-mécaniques de la peau et de son environnement direct, en collaboration avec l'équipe ThM2. Il s'agissait de proposer un modèle thermo-mécanique de la peau tenant compte des effets de la circulation sanguine, dans le but d'étudier le comportement des tissus face aux brûlures. La caractérisation des propriétés mécaniques du tissu vivant a été réalisée par confrontation entre résultats expérimentaux, obtenus par imagerie infrarouge et écho-doppler, et résultats numériques. Le modèle numérique de peau développé tient compte des effets de la perfusion sanguine et du transport de chaleur par les veines sous-cutanées. Grâce à ce modèle réaliste, enrichi par une loi d'endommagement thermique de type Arrhenius, nous avons pu étudier différents traitements d'urgence (refroidissement par air, par eau, par glaçon) des tissus pour limiter la diffusion des brûlures. Les conclusions montrent que le paramètre prépondérant est le temps de réaction face à la brûlure. Elles suggèrent aussi que l'apposition de glaçon sur la zone de brûlure est le traitement le plus favorable. Ces travaux ont fait l'objet de 3 publications dans des revues internationales [A.26, A.39]. A l'occasion de ces travaux de recherche nous avons établi des contacts avec le service de dermatologie du CHU Saint-Eloi de Montpellier, à travers son chef, le professeur B. Guillot. Une collaboration est en cours sur la détection, par thermographie infrarouge et analyse numérique inverse, de l'étendue de la zone sous-cutanée affectée chez les patients atteints d'un mélanome.

Par ailleurs, nous avons engagé, toujours en collaboration avec l'équipe ThM2, des travaux de transfert technologiques avec la société Cerma-Vein. Il s'agissait de calibrer, à l'aide de la thermo-

graphie infrarouge et de modèles numériques, un procédé de traitement des varices par injection de vapeur d'eau dans les veines malades.

2.2 Disque intervertébral et scoliose

La problématique médicale concerne l'étiologie des scolioses idiopathiques chez l'enfant (4% de tous les enfants âgés de 10 à 14 ans). Si la scoliose se développe de façon pathologique au cours de la puberté, le traitement chirurgical (arthrodèse vertébrale) nécessaire pour corriger et bloquer les courbures du rachis est très invasif et contraignant pour les patients. Une meilleure compréhension des facteurs biomécaniques qui conditionnent l'évolution de ce type de scoliose devrait permettre à terme de guider les stratégies thérapeutiques et d'améliorer le confort des patients. Le disque intervertébral est un cartilage, les tissus qui le compose sont des matériaux poreux très hydratés et sont le siège de couplages entre le comportement mécanique, le transfert de la phase fluide et des phénomènes électro-osmotiques. Le disque n'étant pas vascularisé, la nutrition cellulaire est gouvernée par les transferts des nutriments au sein des tissus et les échanges avec les corps vertébraux adjacents. Le rachis scoliotique est considéré comme un système dynamique non-linéaire caractérisé par des instabilités de croissance contrôlées par une cascade d'événements physiologiques, biochimiques et mécaniques.

Dans le cadre de la thèse d'A. Baldit, les tissus périphériques (*annulus fibrosus*) ont été caractérisés expérimentalement. Un dispositif original a été développé permettant de contrôler l'environnement hydrique et chimique lors d'un essai mécanique. Plusieurs caméras associées à des techniques de corrélation d'images conduisent à la détermination des champs de déformation dans les 2 plans transverses de l'échantillon [C2.9, C2.6]. Une approche inverse a permis d'identifier les paramètres d'un modèle poro-hyper-élastique anisotrope à partir d'un essai cyclique suivi d'un essai de relaxation [C1.16]. De plus, les effets électro-osmotiques ont été caractérisés en analysant l'influence des variations de l'environnement chimique sur le comportement mécanique du tissu. Les propriétés matériaux ainsi déterminées ont été introduites dans un modèle numérique d'un disque complet développé sur la plateforme logicielle LMGC90. Le modèle géométrique est construit à partir d'images IRM et paramétré pour introduire différentes perturbations géométriques provenant d'une scoliose. Les simulations numériques permettent d'observer les circulations de fluide au sein d'un disque au cours de sollicitations mécaniques harmoniques. Ces champs de vitesse seront les données d'entrée d'un modèle numérique en cours de développement focalisé sur la description de la croissance du disque.

Autour de cette thématique, un réseau de collaboration s'est mis en place. Il implique l'IMFT de Toulouse (UMR 5502) et les services d'orthopédie pédiatrique des CHU de Montpellier, Toulouse et Lyon. Ce projet a été bien accueilli par la Fondation Yves Cotrel - Institut de France en Novembre 2011 qui a attribué un financement de 75000 euros sur 3 ans pour démarrer l'étude clinique et développer la base de données patients. La poursuite de ce travail a fait l'objet d'une demande de financement déposée auprès de l'ANR en Janvier 2013.

2.3 Identification du risque de rupture des anévrismes cérébraux

L'identification du risque individuel de rupture des anévrismes cérébraux est une thématique de recherche que nous avons initialement menée en collaboration avec F. Nicoud (I3M, Université Montpellier 2) et le service de neuro-radiologie du CHU Guy de Chauliac de Montpellier, à l'occasion de la thèse de M. Sanchez (soutenue en décembre 2012). Cette collaboration s'est élargie au point de créer un consortium de recherche, appelé IRRAs. Il regroupe 4 CHU français (Lille, Marseille, Nîmes et Montpellier), un laboratoire étranger (le CISTIB à Barcelone), les éditeurs de logiciels ANSYS et SIMPLEWARE et la société PHILIPS. Notre contribution a consisté dans un premier temps à déterminer les propriétés rhéologiques des tissus de la poche anévriasmale. Des essais de traction, jusqu'à rupture des tissus, ont été réalisés. Un modèle de comportement du tissu en grandes déformations de type hyperélastique, capable de rendre compte de l'évolution de la contrainte dans le matériau, a été établi. Mais surtout, nous avons mis en évidence une catégorisation des anévrismes. Nous avons observé que les anévrismes rompus avaient un comportement mécanique beaucoup plus souple que les anévrismes non rompus. Ces résultats expérimentaux sont essentiels dans l'élaboration

du risque de rupture. En effet, en les injectant dans un modèle numérisé d'anévrisme issu d'un patient spécifique, nous avons démontré, dans un deuxième temps, que la variation de volume d'un anévrisme souple (vulnérable) pouvait être 8 fois plus importante qu'un anévrisme rigide (saint). Pour cela nous avons mené une campagne de simulation FSI (Interaction Fluide/Structure), en faisant varier les paramètres de simulation (conditions aux limites, épaisseurs de l'anévrisme, rigidité de l'artère source, précontrainte, etc...). Finalement, nous avons proposé un critère d'évaluation du risque de rupture qui confronterait les observations de variation de volumes à l'IRM de l'anévrisme d'un patient avec les simulations FSI pour le même anévrisme en le supposant souple puis rigide. Ces travaux ont fait l'objet de 2 publications dans des revues internationales [A.24, A.32].

Par ailleurs, l'expertise acquise lors de ses travaux de recherche a permis au doctorant, M. Sanchez, de créer une start-up « IRRAs Technology » en incubation à l'Université Montpellier 2 et en collaboration avec notre équipe.

2.4 Biomécanique cellulaire et morphogenèse épithéliale

Ces travaux ont été effectués en collaboration avec l'équipe « Conception en Structures » (B. Maurin, J. Averseng, C. André, Y. Chélin). Il s'agissait, d'une part, de modéliser la structuration du cytosquelette en fonction de l'adhésion cellulaire [A.8, A.11, A.18, C1.1, C1.4, C1.3, C2.2, I.1, I.3, W.4] et, d'autre part, d'étudier la morphogenèse de tissus épithéliaux monocouches en lien étroit avec des biologistes et bio-statisticiens de l'Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier (CNRS - Université Montpellier 2) : K. Hazzag (doctorant), S. Baghdiguian (PU) et F. Rousset (DR). Le point de départ était l'observation d'invariants dans les formes cellulaires à la fin de la morphogenèse épithéliale : pour les tissus non prolifératifs : 60% de cellules hexagonales, 30% de pentagonales, 10% d'heptagonales ; pour les tissus prolifératifs : 45% d'hexagones, 30% de pentagones, 20% d'heptagones et quelques rares tétragones et octogones. Un modèle (milieux divisés) basique 2D de cellule a été développé et la simulation des processus de croissance, de division et de mort cellulaire, permet la formation de tissus numériques sur une surface (sphérique ou plane) jusqu'à en occuper tout l'espace. Les résultats numériques correspondent aux expérimentations et ont mis en évidence le rôle de la vitesse de développement du tissu et du rapport entre mitoses et apoptoses dans l'organisation finale, alors que la géométrie et les conditions limites ne semblent étonnement pas être influentes. En outre, des tests préliminaires consistant à faire se développer un tissu avec deux populations de cellules, dont l'une hyperproliférative, ont montré la faisabilité de telles simulations, ouvrant des perspectives intéressantes dans l'étude de la génération de tumeurs au sein de tissus épithéliaux. Par ailleurs, un modèle (milieux divisés) de structuration du cytosquelette a été développé par Yoann Chélin, afin de mieux analyser le rôle des forces mécaniques, en particulier de la balance entre les tensions et les compressions en jeu, et de leur transmission (mécanotransduction) depuis l'échelle des filaments cytosquelettiques jusqu'à l'échelle du tissu, au cours de la formation d'épithéliums. Ces travaux ont été valorisés par plusieurs communications [A.33, C1.18, C2.7].

De plus, prenant pour cadre clinique le Syndrome de Détresse Respiratoire Aigu (SDRA), une collaboration portant sur la caractérisation biomécanique (force, vitesse et fréquence imposées, présence ou non d'agent infectieux, etc.) des processus de lésion puis de réparation du cortex cellulaire a débuté en 2010 entre l'équipe CGB et l'équipe « Biomécanique Cellulaire et Respiratoire » (E13) de l'Institut Mondor de Recherches Biomédicales (IMRB – UMR 955, Inserm, Université Paris Est Créteil) (financement PEPS de 2 ans). Les expérimentations sont menées à Créteil, couplent microscopie à force atomique (AFM) et microscopie confocale (associée à la reconstruction 3D des images obtenues) et ont permis de mettre en évidence de grandes déformations de la membrane sans rupture apparente, pour des enfoncements de près de 100% du corps cellulaire et pour des vitesses allant jusqu'à $1000\mu\text{m}/\text{s}$, supérieures à celles utilisées pour la fécondation *in vitro* ($700\mu\text{m}/\text{s}$). Un modèle 3D (milieux divisés) développé au LMGC a permis, d'une part, de retrouver ce résultat étonnant et, d'autre part, de poser le problème de la géométrie de la pointe pyramidale utilisée avec l'AFM de Créteil : le diamètre de la pointe et son angle d'ouverture ne semblent permettre, dans ces conditions d'étude, que de repousser les phospholipides membranaires au lieu de les séparer suffisamment pour arriver jusqu'à la rupture des liaisons moléculaires en jeu, entraînant la lésion espérée de la membrane. Une communication au colloque CellMech 2011 résume ces résultats [C2.8].

3 Axe 3 : Approches couplés en milieux poreux

Intervenants : D. Ambard, F. Cherblanc, J. Lewandowska, **P. Royer**

3.1 Couplages chimio-hydro-mécaniques en milieux poreux : homogénéisation

En collaboration avec C. Bouttin de l'ENTPE Lyon, une revue des modèles à double-porosité (écoulement, transport, consolidation) développés par homogénéisation périodique a été proposée. Les domaines de validité de ces modèles sont généralement définis par des critères liés aux rapports des longueurs caractéristiques des différentes échelles mises en jeu. Basé sur une analyse des temps caractéristiques, les domaines de validité ont été ré-interprétés [A.31]. Cette approche conduit à la généralisation des résultats pour d'autres phénomènes physiques. En outre, cela permet une ouverture vers la prise en compte de processus non-linéaires.

La description du couplage entre le comportement mécanique d'un milieu poreux et les phénomènes de transport convectif en son sein est généralement développée directement à l'échelle macroscopique. Cependant, l'analyse par homogénéisation périodique basée sur une écriture du problème physique à l'échelle microscopique a permis de faire émerger un nouveau terme de couplage [A.21]. Il se traduit par un terme convectif lié à la déformation du matériau pondéré par la tortuosité de réseau poreux. Une approche numérique est en cours pour appréhender l'influence de ce terme de couplage sur des simulations à grand nombre de cycles.

3.2 Stratégies numériques pour les problèmes couplés

La caractérisation multi-physiques des matériaux biologiques et la hiérarchisation des couplages microscopiques ou macroscopiques qui expliquent leur comportement à l'échelle mésoscopique, a conduit l'équipe à participer activement au développement de la plateforme logicielle LMGC90. Ceci s'est traduit par l'intégration d'un nouvel élément-fini du type poro-mécanique considérant une phase fluide incompressible saturant la matrice poreuse. Des éléments-finis de type Taylor-Hood P2-iso P1 ont été développés en 2D (triangle à 6 nœuds, quadrangle à 8 nœuds) et 3D (tétraèdres à 10 nœuds et hexaèdre à 20 nœuds) basés sur une formulation lagrangienne permettant des simulations en grandes transformations. Le couplage avec une équation de transport (convection/diffusion) présent dans module de thermique permet maintenant d'envisager les applications liées aux processus de nutrition cellulaire des tissus biologiques.

La modélisation du comportement mécanique des matériaux biologiques repose sur des lois hyper-élastiques et anisotropes. La plateforme LMGC90 est couplée à la librairie de matériaux MATLIB développée par L. Stainier à l'Ecole Centrale de Nantes afin d'inclure ce type de loi de comportement. Ainsi, plusieurs nouvelles familles de matériaux hyper-élastiques et anisotropes ont été intégrées à cette librairie. Celles-ci recouvrent l'ensemble des formulations standards proposées dans la littérature (Néo-Hookeen, Yeoh, Mooney-Rivlin, Arrouda-Boyce, Gent, Hart-Smith, ...) ainsi que des écritures plus spécifiques aux tissus biologiques fibreux (Holzapfel, Gasser & Ogden, 2000; Weiss, Maker & Govindjee, 1996).

Enfin, pour décrire les couplages chimio-mécaniques observées dans les tissus biologiques, un terme décrivant les contraintes d'origine osmotique a été ajouté sur l'ensemble des lois de comportement de la librairie MATLIB. Il est basé sur la définition d'un potentiel électro-osmotique de Donnan considéré à l'équilibre électrique (Ehlers, Karajan & Markert, 2009).

Bibliographie

Articles dans des revues

- [A.1] F. Accadbled, **D. Ambard**, J. Sales Gauzy, and P. Swider. A measurement technique to evaluate the macroscopic permeability of the vertebral end-plate. *Medical Engineering & Physics*, 30 :116–122, 2008.
- [A.2] F. Accadbled, J.M. Laffosse, **D. Ambard**, A. Gommez-Brouchet, J.S. Gauzy, and P. Swider. Influence of location, fluid flow direction, and tissue maturity on the macroscopic permeability of vertebral end plates. *Spine/d000-1002*, 33 :612–619, 2008.
- [A.3] A. Chammari, B. Naon, **F. Cherblanc**, and J.-C. Benet. Interpreting the Drying Kinetics of a Soil Using a Macroscopic Thermodynamic Nonequilibrium of Water Between the Liquid and Vapor Phase. *Drying Technology*, 26 :836–843, 2008.
- [A.4] **F. Cherblanc**, J. Boscus, and **J.C. Bénet**. Electro-osmosis in gel - Application to Agar-Agar. *Comptes Rendus Mécanique*, 336 :782–787, 2008.
- [A.5] **J.Y. Delenne**, Y. Haddad, **J.C. Bénet**, and J. Abécassis. Use of mechanics of cohesive granular media for analysis of hardness and vitreousness of wheat endosperm. *Journal of Cereal Sciences*, 47 :438–444, 2008. **.
- [A.6] A.-L. Lozano, **F. Cherblanc**, **B. Cousin**, and **J.C. Bénet**. Experimental study and modelling of the water phase change kinetics in soils. *European Journal of Soil Science*, 59 :939–949, 2008.
- [A.7] E. Malachanne, **D. Dureisseix**, **P. Cañadas**, and **F. Jourdan**. Experimental and numerical identification of cortical bone permeability. *Journal of Biomechanics*, 41 :721–725, 2008. **.
- [A.8] **B. Maurin**, **P. Cañadas**, H. Baudriller, P. Montcourrier, and N. Bettache. Mechanical model of cytoskeleton structuration during cell adhesion and spreading. *Journal of Biomechanics*, 41 :2036–2041, 2008. **.
- [A.9] **D. Ambard** and **F. Cherblanc**. Mechanical behavior of annulus fibrosus : a microstructural model of fibers reorientation. *Annals of Biomedical Engineering*, 37 :2256–2265, 2009.
- [A.10] **J.C. Bénet**, A.-L. Lozano, **F. Cherblanc**, and **B. Cousin**. Phase change of water in a hygroscopic porous medium. Phenomenological relation and experimental analysis for water in a soil. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 34 :133–153, 2009.
- [A.11] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, and **R. Motro**. Mécanique des systèmes précontraints appliquée à la structure du cytosquelette. *Mécanique & Industries*, 10 :285–290, 2009. **.
- [A.12] G. Guérin, **D. Ambard**, and P. Swider. Cells, growth factors and bioactive surface properties in a mechanobiological model of implant healing. *Journal of Biomechanics*, 43 :1287–1291, 2009.
- [A.13] **V. Huon**, **B. Cousin**, **O. Maisonneuve**, and **B. Wattrisse**. Investigating the thermo-mechanical behaviour of cementitious materials using image processing techniques. *Cement and Concrete Research*, 39 :529–536, 2009. **.
- [A.14] **F. Jourdan** and A. Samida. An implicit numerical method for wear modeling applied to a hip joint prosthesis problem. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198 :2209–2217, 2009. **.
- [A.15] A.L. Lozano, **F. Cherblanc**, and **J.C. Bénet**. Water evaporation versus condensation in hygroscopic soils. *Transport in Porous Media*, 80 :209–222, 2009.

- [A.16] **A. Chrysochoos**, **V. Huon**, **F. Jourdan**, **J.M. Muracciole**, R. Peyroux, and **B. Watrisse**. Use of Full-Field DIC & IRT Measurements for the Thermomechanical Analysis of Material Behavior. *Strain*, 46 :117–130, 2010. **.
- [A.17] **F. Jourdan**. A numerical model for multidirectional wear. *Wear*, 268 :1380–1386, 2010.
- [A.18] **B. Maurin**, **P. Cañadas**, and **R. Motro**. Modélisation en mécanique cellulaire par systèmes de tenségrité. *Techniques de l'Ingenieur*, page RE 117, 2010. **.
- [A.19] S. Ouoba, **F. Cherblanc**, **B. Cousin**, and **J.C. Bénet**. A New Experimental Method to Determine the Sorption Isotherm of a Liquid in a Porous Medium. *Environmental Science and Technology*, 44 :5914–5919, 2010.
- [A.20] S. Ouoba, **B. Cousin**, **F. Cherblanc**, and **J.C. Bénet**. Une méthode mécanique pour mesurer la pression de vapeur d'équilibre de l'eau dans un milieu complexe. *Comptes Rendus Mécanique*, 338 :113–119, 2010.
- [A.21] **P. Royer** and **F. Cherblanc**. Homogenisation of advective-diffusive transport in poroelastic media. *Mechanics Research Communications*, 37 :133–136, 2010.
- [A.22] P. Swider, A. Pedrono, **D. Ambard**, F. Accadbled, and J. Sales De Gauzy. Substructuring and poroelastic modelling of the intervertebral disc. *Journal of Biomechanics*, 43 :1287–1291, 2010.
- [A.23] T. D. Tran Ngoc, **J. Lewandowska**, M. Vauclin, and H. Bertin. Two-scale modeling of solute dispersion in unsaturated double-porosity media : Homogenization and experimental validation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35 :1536–1559, 2010.
- [A.24] V. Costalat, M. Sanchez, **D. Ambard**, L. Thines, N. Lonjon, F. Nicoud, H. Brunel, J.P. Lejeune, H. Dufour, P. Bouillot, J.P. Lhaldky, K. Kouri, F. Segnarbieux, C.A. Maurage, K. Lobotesis, M.C. Villa-Uriol, C. Zhang, A.F. Frangi, G. Mercier, A. Bonafé, L. Sarry, and **F. Jourdan**. Biomechanical wall properties of human intracranial aneurysms resected following surgical clipping. *Journal of Biomechanics*, 44 :2685–2691, 2011.
- [A.25] E. Malachanne, **D. Dureisseix**, and **F. Jourdan**. Numerical model of bone remodeling sensitive to loading frequency through a poroelastic behavior and internal fluid movements. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 4 :849–857, 2011. **.
- [A.26] D. Ratovoson, **V. Huon**, V. Costalat, and **F. Jourdan**. Combined model of human skin - heat transfer in the vein and tissue : experimental and numerical study. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 8 :165–186, 2011. **.
- [A.27] **J.C. Bénet**, A. Ramirez-Martinez, F. Ouedraogo, and **F. Cherblanc**. Measurement of the chemical potential of a liquid in porous media. *Journal of Porous Media*, 15 :1019–1029, 2012.
- [A.28] R. Ferrara, G. Leonardi, and **F. Jourdan**. Numerical Modelling of Train Induced Vibrations. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53 :155–165, 2012.
- [A.29] **J. Lewandowska** and J.-L. Auriault. Extension of Biot theory to the problem of saturated microporous elastic media with isolated cracks or/and vugs. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, page Voir DOI, 2012.
- [A.30] **J. Lewandowska** and M. Pilawski. Experiments and micromechanical modelling of elastic parameters of a composite geomaterial. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17 :46–63, 2012.
- [A.31] **P. Royer** and C. Boutin. Time analysis of the three characteristic behaviours of dual-porosity media. I : fluid flow and solute transport. *Transport in Porous Media*, page voir DOI, 2012.
- [A.32] M. Sanchez, **D. Ambard**, V. Costalat, S. Mendez, **F. Jourdan**, and F. Nicoud. Biomechanical Assessment of the Individual Risk of Rupture of Cerebral Aneurysms : A Proof of Concept. *Annals of Biomedical Engineering*, 41 :28–40, 2012.
- [A.33] Y. Chélin, K. Azzag, **P. Cañadas**, **J. Averseng**, S. Baghdiguian, and **B. Maurin**. Simulation of Cellular Packing in Non-Proliferative Epithelia. *Journal of Biomechanics*, 46 :1075–1080, 2013. **.

- [A.34] F. Deleaval, A. Bouvier, G. Finet, G. Cloutier, S. K. Yazdani, **S. Le Floc'H**, P. Clarysse, I. Pettigrew, R., and J. Ohayon. The Intravascular Ultrasound Elasticity-Palpography Technique Revisited : A Reliable Tool for the In Vivo Detection of Vulnerable Coronary Atherosclerotic Plaques. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 39 :1469–1481, 2013.
- [A.35] **J. Lewandowska** and J.-L. Auriault. Hydro-mechanical coupling in damaged porous media containing isolated cracks or/and vugs : model and computations. *Poromechanics V*, pages 1955–1963, 2013.
- [A.36] B. Naon, **J.C. Bénet**, **B. Cousin**, **F. Cherblanc**, and A. Chammari. Evaporation of a volatile organic compound in a hygroscopic soil - influence of the airflow and its VOC vapour saturation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17 :46–63, 2013.
- [A.37] F. Ouedraogo, **F. Cherblanc**, B. Naon, and J.-C. Benet. Water transfer in soil at low water content. Is the local equilibrium assumption still appropriate? *Journal of Hydrology*, 492 :117–124, 2013.
- [A.38] A. Ramirez-Martinez, M.A. Salgado-Cervantes, G.C. Rodriguez-Jimenes, M.A. Garcia-Alvarado, **F. Cherblanc**, and **J.C. Bénet**. Water transport in parchment and endosperm of coffee bean. *Journal of Food Engineering*, 114 :375–383, 2013.
- [A.39] D. Ratovoson, **F. Jourdan**, and **V. Huon**. A 3D finite element model for hyperthermia injury of blood-perfused skin. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, page Voir DOI, 2013. **.
- [A.40] D. Ratovoson, **F. Jourdan**, and **V. Huon**. Influence of gravity on the skin thermal behavior : experimental study using dynamic infrared thermography. *Skin Research and Technology*, 19 :397–408, 2013. **.

Participations à un ouvrage

- [B.1] **J. Lewandowska**. Modelling by Homogenization of the Long-Term Rock Dissolution and Geomechanical Effects. In Jean-Michel Pereira Gilles Pijaudier-Cabot, editor, *Geomechanics in CO2 Storage Facilities*, page 21 p. ISTE WILEY, 2012.
- [B.2] **F. Jourdan**. A numerical model of wear taking account of multidirectional effects. In *Modélisation du contact et de l'usure*, page 10 p. Presses des Mines, 2013.

Communications avec actes dans des colloques

- [C1.1] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, H. Baudriller, P. Montcourrier, and N. Bettache. Numerical model of the cytoskeleton structuration during cell spreading. In *Proceedings of the 16th Congress ESB*, pages Cd–Rom, Lucerne, Suisse, 2008.
- [C1.2] **D. Ambard** and **F. Cherblanc**. Is annulus fibrosus a non-linear poro-elastic biological tissue? In *Poro-Mechanics IV*, pages 83–88, États-Unis, 2009.
- [C1.3] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, and **R. Motro**. Mécanique des systèmes précontraints appliquée à la structure du cytosquelette. In *Congrès Français de Mécanique*, page xxx, Marseille, France, 2009.
- [C1.4] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, and **R. Motro**. Prestressed system mechanics applied to the cytoskeleton structure. In *Mécanique et Industries*, volume 10, pages 285–290, Marseille, France, 2009.
- [C1.5] E. Malachanne, **D. Dureisseix**, and **F. Jourdan**. Numerical model of bone remodeling taking into account fluid phasis. In *Proceedings of the 1st International Conference on Tissue Engineering*, page 8 pages, Leira, Portugal, 2009.
- [C1.6] **P. Royer** and **F. Cherblanc**. Mechanically-induced solute transport in a saturated elastic porous medium : analysis by homogenization. In *Poro-Mechanics IV*, pages 473–478, États-Unis, 2009.

- [C1.7] T. D. Tran Ngoc, **J. Lewandowska**, H. Bertin, M. Vauclin, and L. C. Do Hong. Dispersion in double-porosity unsaturated medium : from experiment towards modeling by homogenization. In R. Betti DEStech Publications Inc H.I. Liang, A. Amyth, editor, *POROMECHANICS IV*, pages 306–311, États-Unis, 2009.
- [C1.8] **J. Lewandowska**. Modeling of water flow and solute transport in double porosity unsaturated porous media : theory, two scale computations and experiments. In *Proceedings of the IVth European Conference on Computational Mechanics*, pages 1–2, Paris, France, 2010.
- [C1.9] A. Ramirez-Martinez, **J.C. Bénet**, **F. Cherblanc**, M.A. Garcia-Alvarado, and G. Rodriguez-Jimenes. Internal structure and water transport in the coffee bean. In *Proceedings of the 17th International Drying Symposium*, pages 1–8, Magdeburg, Allemagne, 2010.
- [C1.10] D. Ratovoson, **F. Jourdan**, and **V. Huon**. A study of heat distribution in human skin : use of Infrared Thermography. In *EPJ Web of Conferences*, pages 1–8, France, 2010.
- [C1.11] **F. Cherblanc**, **D. Ambard**, A. Baldit, and J.M. Lafosse. Mechanical behaviour of annulus fibrosus : the role of the fluid phase. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Porous Media*, page Clé USB, France, 2011.
- [C1.12] **F. Jourdan** and S. Dumont. Eléments finis espace-temps 4D. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.13] M. Sanchez, **D. Ambard**, C. Vincent, **F. Jourdan**, and F. Nicoud. Identification du risque individuel de rupture des anévrismes cérébraux intracrâniens : une approche biomécanicienne. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.14] A. Baldit, **D. Ambard**, **F. Cherblanc**, and **P. Royer**. Chemo-hydro-mechanical coupling in annulus fibrosus tissue. In *Journal of Biomechanics 45(S1)*, page 1, Portugal, 2012.
- [C1.15] Y. Chélin, K. Azzag, **P. Cañadas**, S. Baghidiguian, and **B. Maurin**. A mechanical and numerical approach applied to epithelium topology and development. In *Journal of Biomechanics - Special Issue*, page 1, Portugal, 2012.
- [C1.16] A. Baldit, **D. Ambard**, **F. Cherblanc**, and **P. Royer**. Digital image correlation on Annulus Fibrosus soft tissue. In *Proceedings of PhotoMechanics 2013*, page 4 p., Montpellier, France, 2013.
- [C1.17] A. Baldit, **D. Ambard**, **F. Cherblanc**, and **P. Royer**. Mechanical behavior of annulus fibrosus tissue : identification of a poro-hyper-elastic model from experimental measurements. In *Proceedings of the 11 International Symposium, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, pages 80–81, Salt Lake City, États-Unis, 2013.
- [C1.18] Y. Chélin, **J. Averseng**, **P. Cañadas**, and **B. Maurin**. Divided media based simulations of tissue morphogenesis. In *Actes du 38ème Congrès de la Société de Biomécanique*, page 2 p., Marseille, France, 2013.
- [C1.19] Y. Chélin, **J. Averseng**, **P. Cañadas**, and **B. Maurin**. Modèle granulaire de morphogénèse tissulaire. In *Actes du CSMA 2013*, pages 8 p., Clé USB, Giens, France, 2013.
- [C1.20] M. B. Kébré, **F. Cherblanc**, F. Ouedraogo, **J.C. Bénet**, and F. Zougmoré. Flow at Low Water Contents : A Simple Approach for Inverse Estimation of van Genuchten-Mualem Soil Hydraulic Parameters. In *Proceedings of the 4th International Conference HYDRUS Software Applications to Subsurface Flow and Contaminant Transport Problems*, page 12 p., Prague, Tchèque, République, 2013.

Communications sans actes dans des colloques

- [C2.1] **D. Ambard**, **F. Cherblanc**, and J.-M. Lafosse. Comportement poro-mécanique de l'annulus fibrosus. In *9èmes Journées d'Etude sur les Milieux Poreux*, France, 2009.
- [C2.2] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, R. Peyroux, and **R. Motro**. Modélisation cellulaire par systèmes précontraints. In *Journées du GDR Mécanotransduction : déterminants et implications*, Marseille, France, 2009.

- [C2.3] F. Ouedraogo, B. Naon, F. Zougmore, **F. Cherblanc**, and **J.C. Bénet**. Etude des transferts d'eau dans un sol à faible teneur en eau. In *5ème Conférence of Africa Soil Science Society Office*, Yaoundé, Cameroun, 2009.
- [C2.4] S. Ouoba, **F. Cherblanc**, and **J.C. Bénet**. Etude des transferts d'un pesticide dans un sol aride; cas d'un composé modèle : TCE. In *9èmes Journées d'Etude sur les Milieux Poreux*, France, 2009.
- [C2.5] S. Ouoba, **F. Cherblanc**, **B. Cousin**, and **J.C. Bénet**. Etude des transferts de pesticides dans les couches superficielles des sols arides; cas d'un composé modèle : le trichloréthylène (TCE). Simulation des phénomènes de transfert. In *28èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*, France, 2010.
- [C2.6] A. Baldit, **D. Ambard**, **F. Cherblanc**, and **P. Royer**. Mechanical behaviour of biological tissue - Anisotropy, non-linearity and fluid flow in annulus fibrosus. In *EUROMAT 2011 : European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes*, France, 2011.
- [C2.7] Y. Chélin, **P. Cañadas**, C. André, and **B. Maurin**. Cytoskeleton numerical morphogenesis in cell adhesion. In *The 4th European Cell Mechanics Meeting (CellMech 2011)*, Amsterdam, Pays-Bas, 2011.
- [C2.8] S. Féréol, R. Fodil, D. Isabey, and P. Cañadas. Some features of the mechanical response of living cells to large deformations. In *The 4th European Cell Mechanics Meeting (CellMech 2011)*, Pays-Bas, 2011.
- [C2.9] A. Baldit, **D. Ambard**, **F. Cherblanc**, and **P. Royer**. Couplage hydro-chemo-mécanique de l'annulus fibrosus. In *Journées d'Étude sur les Milieux Poreux (JEMP2012)*, France, 2012.
- [C2.10] M. L'Kaissi, J.-P. Berthet, M. Sagintaah, **D. Ambard**, **F. Cherblanc**, A. Baldit, and J. Cortalorda. Croissance asymétrique des côtes : Étude expérimentale chez le cochon. In *Les journées de la SOFOP*, Montpellier, France, 2012.

Conférences invitées

- [I.1] **P. Cañadas**, **B. Maurin**, and H. Baudriller. Initial stress system modelling applied to adherent cell mechanics. In *Human Biomechanics 2008*, Prague, Tchèque, République, 2008.
- [I.2] G. Guérin, **D. Ambard**, and P. Swider. A mechano-biological model to predict the role of implant surfaces in the periprosthetic healing. In *Proceedings of the 16th Congress of the european society of biomechanics*, pages Cd-Rom, Lucerne, Suisse, 2008.
- [I.3] **B. Maurin**, **P. Cañadas**, and **R. Motro**. Tensegrity architecture calculation of the cellular cytoskeleton. In *IASS-IACM2008, 6th ICCSS*, Ithaca, New-York, États-Unis, 2008.

HDR

- [H.1] **F. Cherblanc**. *Des milieux polyphasiques aux milieux complexes*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2008.
- [H.2] **B. Cousin**. *Sols et Bétons - Transferts de matière et mécanique de la durabilité*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, June 2010.

Thèses

- [T.1] E. Malachanne. *Modélisation du remodelage osseux sous sollicitations mécaniques : prise en compte de la phase fluide*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2008.
- [T.2] F. Ouedraogo. *Etude des transferts d'eau à l'interface sol-atmosphère. Cas d'un sol du Burkina Faso à faible teneur en eau*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, June 2008.

- [T.3] S. Ouoba. *Adsorption et transport d'un Composé Organique Volatil (COV) dans un sol hygroscopique. Application aux pesticides dans un sol aride*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2009.
- [T.4] A. Ramirez-Martinez. *Internal structure and water transport in endosperm and parchment of coffee bean*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, September 2011.
- [T.5] D. Ratovoson. *Propriétés thermomécaniques de la peau et de son environnement direct*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2011.
- [T.6] M. Sanchez. *Identification du risque individuel de rupture des anévrismes cérébraux intra crâniens : une approche biomécanicienne*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, November 2012.
- [T.7] R. Ferrara. *A numerical model to predict train induced vibrations and dynamic overloads*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc ; University of Reggio Calabria, May 2013.

Autres publications

- [W.1] **P. Cañadas**. La Mécanique et ses applications, 2008.
- [W.2] E. Malachanne, **F. Jourdan**, and **D. Dureisseix**. Numerical model of bone remodelling sensitive to loading frequency, 2008.
- [W.3] **J.C. Bénet**, **F. Cherblanc**, **B. Cousin**, and S. Ouoba. Dispositif de mesure de l'activité d'un liquide dans un milieu complexe et procédé associé, November 2009.
- [W.4] **P. Cañadas**. Structure, prestress and mechanical modelling in cell/tissue biomechanics, 2009.
- [W.5] **P. Cañadas**. La Mécanique et ses applications, 2010.
- [W.6] A. Baldit, **D. Ambard**, **F. Cherblanc**, and **P. Royer**. Mechanical behaviour of biological tissue : anisotropy, non-linearity and fluid flow in annulus fibrosus, 2011.
- [W.7] **P. Cañadas**. La Mécanique et ses applications, 2011.

4 Mécanique de l'Arbre et du Bois (MAB)

Intervenants : T. alméras (CR), O. Arnould (MCF), S. Bardet (MCF), I. Brémaud (CR CNRS), B. Chanson (CR CNRS), B. Clair (départ 2012), J. Gril (DR CNRS), D. Julien-Pierre (MCF), B. Thibaut (DR CNRS émérite),

Doctorants : J. Dlouha (Financement étudiants étrangers, 2005-2009), B. Marcon (BDI CNRS-Région, 2006-2009), K. Bytebier (MRT, 2006-2009), C. Montéro (MRT, 2007-2010), J. Colmars (BDI CNRS, 2007-2011), A. Se Golpayegani (Financement étudiants étrangers, 2008-2011), M. El Mouridi (Financement étudiants étrangers, 2008-2011), P. Gherardi Hein (Financement étudiants étrangers, 2008-2011), P. Darabi (Financement étudiants étrangers, 2009-2012), A. Gronvold (MRT, 2010-2013), S. Chang (MRT, 2011-2013), E. Foulhé (2008-soutenance prévue en 2014 (interruption 1 an)), R. Abedini (Financement étudiants étrangers, 2011-2014), C. Gauvin (MRT, 2012-2015), E. Karami (Financement étudiants étrangers, , 2012-2015), A. Burgers (Labex Numev-Ecole des Mines, 2013-2016), C. Carlier (BDI CNRS, 2013-2016).

1 Introduction

Durant le précédent quadriennal l'équipe a poursuivi une double évolution thématique, vers le fondamental et le microscopique pour le bois dans l'arbre et vers les usages et l'échelle structurelle pour le bois de structure pour l'homme. Même si les travaux liés aux conséquences technologiques des contraintes de croissance se sont poursuivis, l'accent est mis de plus en plus sur la compréhension des mécanismes qui en sont à l'origine ou qui en résultent, tandis que la biomécanique est envisagée dans ses implications pour l'écologie. Les méthodes d'observation mises au point ont permis d'aborder avec un regard neuf la recherche des déterminants structuraux du comportement rhéologique qui reste un thème central appliqué aussi bien au bois vert que sec. Mais concernant ce dernier, on peut constater l'émergence de thématiques liées aux usages, dans le patrimoine culturel surtout mais également en construction.

Avec le départ de B. Clair en 2012 pour la Guyane et l'arrivée d'I. Brémaud (tous deux CR CNRS), l'équipe conserve un potentiel de recherche stable, tandis que l'accueil provisoire de Carole Assor (CR INRA) depuis 2011 a permis d'y introduire la compétence en biochimie qui manquait. Les efforts pour introduire le bois dans les enseignements à l'Université se sont traduits par la création d'une nouvelle unité d'enseignement des sciences du bois au niveau Master 2, tandis qu'un poste fléché structure bois à l'IUT de Nîmes, non pourvu en 2012 au niveau professeur, a été reconduit en 2013 au niveau MCF.

Les relations avec le Cirad ont été entretenues par le biais de plusieurs thèses coencadrées [T.7, T.6, T.8] et devraient trouver un nouveau souffle du fait de thématiques portées par I. Brémaud. Formalisées par l'appartenance commune des plateformes expérimentales au GPTR, elles doivent désormais être redéfinies avec la nouvelle UPR 114 « Biomasse Bois Energie Bioproduits » qui depuis février 2012 englobe l'ancienne UPR 40 « Bois Tropicaux ».

2 Axe 1 : effet du temps sur le comportement mécanique du bois

L'objectif de cet axe est d'élucider les mécanismes de déformation expliquant la réponse à long terme du bois, qu'il s'agisse des phénomènes dépendant du temps observés sur bois saturé en eau

ou dans le domaine hygroscopique. Il se décline en trois champs d'investigation : la rhéologie du bois vert, le comportement du bois dans le domaine hygroscopique - avec deux grands domaines d'application : le bois de structure et le bois dans les panneaux peints -, les déterminants structurels du comportement visco-élastique.

2.1 Rhéologie du bois vert

Ce thème est d'une part un préalable à la compréhension de la biomécanique des tiges (axe 2) [I.2] et d'autre part l'occasion d'aborder des questions plus générales concernant le fluage du bois à long terme, tout en s'affranchissant des variations d'humidité.

Un résultat marquant de la période, obtenu au cours de la thèse de Jana Dlouha, concerne les précautions à prendre pour le stockage des échantillons pour les garder à l'état vert : stocker les échantillons dans l'eau froide préserve les propriétés d'origine du bois, en revanche l'éthanol, acceptable au regard des propriétés élastiques, induit un changement significatif des propriétés viscoélastiques. Le stockage à l'air libre, quant à lui, entraîne des changements importants et en partie irréversibles, même si le module sec à l'air fournit une bonne base pour les études comparatives de rigidité élastique du bois vert [A.50].

Une procédure d'évaluation du fluage à long terme en traction longitudinale, basée sur l'application du principe d'équivalence temps-température, a été mise au point à partir d'essais à différentes températures [A.15, T.2]. La mise en évidence du vieillissement physique suite au refroidissement consécutif au chauffage au-dessus de la température de transition vitreuse du bois conduit à reconsidérer les procédures de reconditionnement d'échantillons visant à les réutiliser pour réduire les biais de la variabilité [A.16].

2.2 Le comportement du bois dans le domaine hygroscopique

Ce thème s'est organisé autour de deux grandes applications : l'une concerne le comportement du bois dans la direction longitudinale pour une application en structures, l'autre concerne le comportement transverse pour l'application aux panneaux peints. Nous avons été amenés à aborder par ce biais la question du vieillissement du bois, notamment en forte collaboration avec nos collègues japonais et suisses.

Les collaborations informelles avec David Hunt sur le comportement différé du bois dans la direction des fibres ont été poursuivies et concrétisées par la mise en place d'expérimentations au LMGC lors de la thèse de Cédric Montero [T.3] dans le cadre du projet Mechwood [A.49]. Elles ont permis de démontrer la forte interaction entre réponse visco-élastique et mécanosorptive à haute humidité et suggèrent des pistes pour la ré-évaluation du facteur K_{def} utilisé pour le dimensionnement des structures dans les Eurocodes [A.59]. La formulation alternative par hygro-verrous a été explorée en collaboration avec l'Université de Limoges pour représenter les blocages mécanosorptifs [C2.47].

L'étude sur les panneaux peints initiée par le cas de La Joconde en 2004 a évolué par la mise en place d'une réelle thématique au sein de l'équipe, s'appuyant sur l'action COST IE0601 [A.63] qui a permis de renforcer les liens avec les équipes italiennes et de se rapprocher des acteurs de la conservation et de la restauration afin de mieux prendre en compte leurs demandes. La modélisation numérique a été développée en collaboration avec l'équipe M3 au cours de la thèse de Bertrand Marcon qui a initié le couplage entre LMGC90 et Transpore, un code de calcul de transfert de masse et chaleur développé par P. Perré [C2.30, A.38, C2.40]. Les modèles numériques sont de première importance dans cette thématique, car ils permettent d'effectuer des expérimentations « virtuelles » qui ne pourraient pas être conduites sur les panneaux peints eux-mêmes, pour ne pas risquer de les endommager. Pour valider ces modèles, il est nécessaire de collecter des données in situ, sur les panneaux réels, dans les musées, les églises, etc. Le renforcement des relations avec les acteurs patrimoniaux a permis un accès privilégié à plusieurs panneaux, pour lesquels nous disposons à présent d'informations sur le climat hygrométrique, les mouvements ou les déformations du bois [?, C1.10, T.4]. Les méthodes d'instrumentation elles-mêmes ont été objet d'étude : i) le « kit déformométrique », permettant de mesurer courbure et déformation d'un panneau en continu, a été comparé à d'autres méthodes et fait l'objet d'une modélisation afin de mieux appréhender ses conditions d'utilisation et l'interprétation des me-

sures [A.63, C2.73]; ii) un nouveau système de contrôle de courbure de panneau combinant traverses et ressorts a été développé [A.56]. Ces avancées sur les méthodes d'instrumentations ont nécessité des expérimentations en environnement contrôlé sur répliques de tableaux, permettant d'utiliser des méthodes de suivi de déformations précises qui ne pourraient pas forcément être utilisées sur des objets historiques, telle que la corrélation d'images qui nécessite d'appliquer un mouchetis sur le panneau. Une opération de restauration menée par un étudiant de l'Institut National du Patrimoine a pu faire l'objet d'une étude technique préalable employant ce type de méthode.

L'effet de l'âge sur les propriétés du bois, question posée d'emblée par l'analyse d'objets du patrimoine, a été abordé en collaboration avec l'Université de Kyoto, à l'occasion d'un séjour de J. Gril comme professeur invité en 2009. La comparaison d'échantillons d'âge croissant jusqu'à 1600 ans prélevés dans des temples japonais avec des échantillons traités thermiquement, a permis de décrire par des modèles thermoactivés l'évolution de propriétés physiques et mécaniques [A.20, A.41], tandis que des traitements thermiques modérés mais réalisés en ambiance non anhydre permettent d'envisager une meilleure reproduction des mécanismes complexes impliqués dans le vieillissement naturel du bois [T.9].

2.3 Déterminants structurels du comportement viscoélastique

Au-delà du rôle bien connu de l'inclinaison des microfibrilles cellulosiques, l'influence des extractibles sur l'amortissement du bois, mise en évidence par I. Brémaud [A.35], a été étudiée dans le cas du mûrier blanc - essence traditionnellement utilisée pour la confection d'instruments de musique iraniens - [A.61] tandis que le rôle également important de la lignine a été démontré par l'étude de bois de compression [A.65] ou celui de l'orientation des tissus, par celle d'un bois tropical fortement contrefilé [A.23]. Une étude sur la loupe de thuya, matériau fortement valorisé dans l'artisanat marocain, a permis d'aborder l'effet d'une désorientation tissulaire extrême, ou subsiste néanmoins une anisotropie liée à la distribution des excroissances [A.39, T.5].

L'étude de la déformation de la cellulose au moyen de la diffraction des rayons X (DRX) [A.58] conduit à reconsidérer la contribution au comportement macroscopique des constituants macromoléculaires en relation avec leur disposition relative dans la paroi cellulaire [C2.70]. Ces résultats peuvent conduire à reformuler les modèles rhéologiques et remettent à l'honneur l'idée de glissements interfibrilles déjà suggérée par Hunt et Gril en 1996.

3 Axe 2 : origine biologique des propriétés mécaniques du bois

Les avancées sur cet axe de recherche ont principalement été structurées par l'étude des contraintes de maturation et du bois de tension dont le contexte et les résultats marquants sont détaillés ici. D'autres travaux sur le déterminisme des propriétés des bois ont été réalisés dans le cadre de cet axe, mais ne sont pas détaillés dans ce rapport. On se contentera de citer à ce titre :

- Des études sur les relations microstructure-propriétés des bois de différentes espèces [T.6, A.53, A.43, C1.11, C1.17], dont un point commun marquant est la mise en évidence de la pertinence de l'angle des microfibrilles de cellulose en tant que déterminant important des propriétés mécaniques et biomécaniques.
- Des études sur les variations de propriétés mécaniques entre les bois juvéniles et adultes d'espèces tropicales [A.52, A.43, A.42], montrant notamment que le gradient habituellement observé chez les espèces tempérées et les espèces de plantation est inversé dans le cas des forêts tropicales naturelles.

Les travaux sur les contraintes de maturation et le bois de tension sont ici présentés en 3 thèmes : écologie biomécanique, implications technologiques et micro-biomécanique. Il est à noter que ces 3 thèmes sont fortement interconnectés et que, parmi eux, le 3ième est celui pour lequel les avancées les plus notables ont été réalisées.

3.1 Ecologie biomécanique et fonction motrice du bois pour les arbres

Ce thème est lié à la poursuite et à la valorisation scientifique des travaux engagés lors du projet ANR « Woodiversity ». Il s'agit de l'étude de la fonction biologique des contraintes de maturation et de son implication dans les stratégies adaptatives des arbres, contribuant au maintien de la biodiversité. Le développement de modèles biomécaniques a permis de formaliser le déterminisme de la « performance motrice » des arbres, c'est-à-dire leur capacité à se réorienter et à contrecarrer l'effet de la gravité durant leur croissance, par la mise en place de contraintes de maturation dans le bois en formation. Ces formulations ont permis d'étudier de façon théorique l'effet du dimensionnement et de facteurs de forme, mettant par exemple en évidence les limites intrinsèques de ce mécanisme au travers d'un effet d'échelle qui implique que la capacité des arbres à maintenir leur posture devient fortement limitée quand leur taille augmente, et que cette limitation peut être plus importante que les autres types de contraintes mécaniques antérieurement étudiées par les biologistes (hauteur critique de flambement) [A.10, C1.3]. L'application de ces modèles à des études expérimentales a démontré la contribution à cette performance motrice de facteurs de forme précédemment négligés (croissance excentrique) [A.9, A.19, C2.35], et le fait que le niveau de performance atteint est lié à la stratégie de croissance des espèces en forêt tropicale [C2.66, A.9, C2.23, C2.28]. En se basant sur ces mêmes modèles, les formulations analytiques permettant le calcul du champ de précontrainte dans les troncs ont été généralisées, ce qui a permis de montrer l'existence d'une autre limite à ce niveau de performance, que l'on peut exprimer par analogie au cas des animaux par « il est avantageux d'avoir des muscles puissants... sauf s'ils sont assez puissants pour endommager l'os auquel ils sont attachés » [C2.69, C2.57, ?].

3.2 Implications technologiques des contraintes de maturation et du bois de tension

Ce thème s'inscrit dans la poursuite de l'activité historique de l'équipe sur cette question. Il vise à comprendre l'impact des contraintes de maturation sur l'exploitation forestière et la qualité des bois. Un premier aspect concerne l'étude des précontraintes dans les tiges, responsable de l'apparition de fentes à cœur ou de la distorsion des débits lors du sciage. L'analyse de travaux expérimentaux en forêt réalisés antérieurement sur hêtre [A.67] et nouvellement sur eucalyptus [C2.62], a confirmé l'insuffisance des mesures de déformations résiduelles de surface dans la direction des fibres. La confrontation des modèles analytiques de calcul des champs de précontraintes [C2.69, ?] à la mesure de leur distribution au sein des troncs montre que ce fait s'explique par l'influence de l'histoire biomécanique de l'arbre [C1.12]. Un autre aspect concerne les propriétés physico-mécaniques des bois de tension qui sont à l'origine des forts niveaux de contraintes de maturation. Leurs propriétés visco-élastiques ont pour la première fois été caractérisées [A.57] et l'étude de leur retrait paradoxal au séchage a été poursuivie par diverses voies expérimentales [A.4, A.14, A.13, A.47] menant à une compréhension globale du phénomène : ce fort retrait est dû au cumul de l'effet de la forte mésoporosité et de la relaxation d'autocontraintes à l'échelle microscopique [A.48].

3.3 Micro-biomécanique des mécanismes de mise en place des contraintes de maturation

L'objectif de ce thème est de comprendre comment, au cours de la formation du bois de tension, se met en place un fort niveau de contraintes qui est à l'origine de sa fonction biologique et de beaucoup de ses propriétés technologiques. Cette question connaît actuellement un fort regain d'intérêt de la part des biologistes et l'approche mécanique développée par l'équipe dans ce contexte est originale et a permis des avancées importantes. La collaboration avec les physico-chimistes a permis de mettre en évidence que la « couche gélatineuse », spécifique des bois de tension d'espèces tempérées, a une structure méso-poreuse similaire à celle d'un gel [A.4, A.13]. Cette découverte, cumulée aux travaux antérieurs de l'équipe sur la microstructure et le comportement du bois de tension, a stimulé une réflexion critique sur les mécanismes hypothétiques de mise en place des contraintes de maturation, permettant de réfuter les modèles actuellement proposés dans la littérature et de formuler de nouvelles hypothèses [C2.56, C1.3]. Le développement d'un modèle mécanique simulant ces mécanismes [C2.15,

C2.13], a permis d'identifier les données nécessaires à la validation quantitative de ces hypothèses, dont l'acquisition a été réalisée via diverses techniques expérimentales : mesure, à l'échelle de la paroi des cellules en formation, des propriétés élastiques par microscopie à force atomique [T.1, C1.7, C1.6], de l'orientation des polymères par FTIR [C2.61], de l'évolution de la méso-porosité (Thèse S.S. Chang en cours). Une avancée fondamentale a été la mise en évidence, par microdiffraction X synchrotron, de la mise en tension de la cellulose au cours du développement [A.37, C1.9], qui, couplée à la mise en évidence de l'état de contrainte transverse du bois de tension [C2.62], conforte le mécanisme proposé. Tous ces travaux se poursuivent maintenant au sein de l'ANR blanche « Stress in Trees » obtenue en 2012.

4 Axe 3 : caractérisation et modélisation multi-échelle du bois

Les avancées sur cet axe correspondent aux développements des outils d'observation et d'analyse physique, principalement mécanique, nécessaires aux axes 1 et 2. Ces développements induisent des questionnements scientifiques spécifiques avec la mise au point, l'adaptation au bois et la maîtrise d'outils de caractérisation physique à toutes les échelles. Les aspects modélisation spécifiques à cet axe ont été peu abordés pour le moment [A.21] et se retrouvent principalement dans les activités des axes 1 et 2.

Les résultats obtenus dans cet axe sont présentés ici en trois thèmes : microscopie à force atomique, caractérisations mécaniques macroscopiques et nouvelles techniques de caractérisation mécanique.

4.1 Microscopie à force atomique (AFM)

Ce thème correspond à la poursuite de la collaboration avec R. Arinero de l'IES de l'UM2 sur l'utilisation et l'optimisation du mode dit RC-AFM pour la caractérisation mécanique de la paroi cellulaire du bois dans différents cas d'étude allant de la biomécanique de l'arbre (axe 2) à la mécanique multi-échelle du bois de structure.

Le développement et une meilleure compréhension de cet outil de caractérisation et de sa calibration ont été possibles grâce au soutien du CNRS (délégation O. Arnould en 2008-2009, financement « prise de risque » NanoMecPar en 2009), du CS de l'UM2 (appels d'offre « programmes pluri-disciplinaires » 2009) et de la fin de la thèse de K. Bytebier [T.1]. Ceci a permis d'en faire une technique « de routine » au moins d'un point de vue semi-quantitatif [C1.29, C2.37, C1.6]. Ce quadriennal a vu aussi la mise en place d'une collaboration pérenne avec M.T. Cuberes de l'Université Castilla-La Mancha d'Almadén (ES) grâce à deux STSM dans le cadre de l'action COST FP0802. Ceci a permis d'appliquer un autre mode, dit UFM, sur des parois cellulaires de bois et la comparaison des résultats obtenus par UFM et RC-AFM a permis de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chacune des techniques mais aussi de comprendre l'effet primordial de la préparation de l'échantillon de bois sur les mesures [C2.58].

4.2 Caractérisations mécaniques macroscopiques

Cette thématique est historique dans l'équipe et repose sur le besoin de caractériser le comportement viscoélastique du bois couplé avec des chargements hygrothermiques en relation avec sa structure en utilisant la diversité de la ressource. Les données obtenues permettent d'alimenter les modèles de comportement macroscopique pour les axes 1 (bois sec de structure) et 2 (bois vert pour l'arbre). Les faits les plus marquants au cours du dernier quadriennal reposent sur l'utilisation maintenant systématique d'environnement contrôlé pour le bois sec, l'acquisition et la prise en main d'une DMA dans le cadre de l'ANR « Woodiversity » (2006-2010). Cette technique a été utilisée pour comprendre les spécificités rhéologiques du bois de tension avec et sans couche G (axe 2) [A.57, C1.16, C2.17] mais aussi pour comprendre l'effet des extractibles sur le comportement rhéologique dans les trois directions d'orthotropie de bois sec (axe 1) [A.61]. Elle a aussi été utilisée pour la mesure du comportement de réplique de paroi cellulaire secondaire du bois en collaboration avec l'INRA de Reims et de Nantes, dans le cadre de l'ANR « Analogs » (2008-2012), et pour l'étude de la paroi primaire dans le cadre du détachement de C. Assor de l'INRA de Nantes [C2.74].

4.3 Nouvelles techniques de caractérisation mécanique

L'objectif de ce thème est de tester, voire développer de nouvelles techniques de caractérisation mécanique à l'échelle macroscopique, permettant de s'affranchir de la forte variabilité entre échantillons. En se positionnant à des échelles fines il vise à comprendre le lien entre des chargements macroscopiques et la déformation des constituants de la paroi.

Le premier résultat marquant pour l'équipe porte sur l'utilisation en routine de la diffraction des rayons X (DRX) pour mesurer un paramètre structural primordial, i.e., l'angle des microfibrilles, et la déformation in situ des cristaux de cellulose au cours d'un chargement thermohygomécanique de type séchage ou fluage aussi bien dans le domaine élastique que post-élastique. Ceci est possible grâce à une collaboration pérenne avec A. Van der Lee de l'IEM de l'Université Montpellier 2 [A.58, C2.34, C2.70, C2.53, C2.36, C2.48, C2.33]. La maîtrise de cet outil nous a aussi permis de réaliser ce type d'expérience au synchrotron de l'ESRF pour répondre à des questions de biomécanique de l'arbre de l'axe 2 sur la mise en place des contraintes de croissance [A.37, C2.20] et de lancer une collaboration avec Cédric Montero de l'ESRF, anciennement étudiant en thèse au sein de l'équipe [T.3].

Le second résultat marquant est le développement et l'adaptation au matériau bois de la technique Résonnant Ultrasound Spectroscopy (RUS) grâce à une collaboration avec Stéphane Pagano de l'équipe M3 du LMGC (groupe de recherche sur les problèmes inverses) et l'équipe MIRA de l'IES de l'UM2 avec l'obtention du financement du post-doctorat de R. Longo (2012-2013) dans le cadre du Labex NUMEV. Cette technique, toujours en cours de développement, permet de déterminer, en une seule mesure, les 9 constantes élastiques d'un unique échantillon cubique de bois [A.54, C1.30]. Elle a aussi été couplée à un banc ultrasonore de détermination des directions principales sur échantillons sphériques développé au cours du quadriennal [A.39, C1.23, C2.50, T.5].

Enfin, le dernier fait marquant est le recours à la (stéréo)corrélation d'images parallèlement aux autres techniques de caractérisation mécanique mentionnés ci-dessus dans cet axe. Cette technique a été utilisée à l'échelle macroscopique, en collaboration avec L. Sabatier (IR, LMGC), pour la mesure de champ de déformation en surface d'échantillon de bois soumis à des chargements hygrothermiques (axe 1), au cours du stage de Master 2 d'A. Rouard (2010-2011) et C. Gauvin (2011-2012) maintenant en thèse dans l'équipe, ou pour l'étude de réplique de paroi cellulaire sous forme de film mince soumis à ces chargements mécaniques en atmosphère contrôlée au sein de la DMA, dans le cadre du détachement de C. Assor (INRA Nantes). L'utilisation de ces techniques de corrélation d'images a aussi été tentée à des échelles plus petites. Tout d'abord en la couplant à de l'imagerie par AFM, en collaboration avec M. George du L2C de l'Université Montpellier 2 et S. Roux du LMT de l'ENS Cachan dans le cadre du stage de Master 2 de A. Baldit (2009-2010), afin de mesurer les propriétés transverses de la paroi cellulaire. Une autre tentative a été d'utiliser la micro-tomographie aux rayons X en collaboration avec D. Derome de l'EMPA de Zurich (CH) afin de mesurer des champs de déformation 3D à l'échelle des fibres au cours d'un séchage.

Ces différents thèmes ont suscité de nombreux partenariats « sciences pour l'ingénieur » plus ou moins réguliers aussi bien localement au sein de l'UM2 qu'à l'échelle nationale et internationale. Ils ont aussi donné lieu à une forte implication de l'équipe dans l'action COST FP0802 (2008-2012). Ceci a donné lieu à la rédaction d'un article de synthèse [A.66, C2.65], à la participation régulière aux différents workshops ou école d'été [C1.4] et à l'organisation d'une école de printemps "Acoustic, ultrasonic and AFM characterization of wood mechanical properties" à Montpellier, en partenariat avec l'IES et le CIRAD, du 21 au 25 mai 2012.

Bibliographie

Articles dans des revues

- [A.1] **T. Alméras**. Mechanical analysis of the strains generated by water tension in plant stems. Part II : strains in wood and bark and apparent compliance. *Tree Physiology*, 28 :1513–1523, 2008.
- [A.2] **T. Alméras**, **J. Gril**, **D. Jullien**, and M. Fournier. Les contraintes de croissance dans les tiges : mécanismes de mise en place et conséquences sur leur résistance à la flexion. *Revue Forestière Française*, LX :749–760, 2008.
- [A.3] **O. Arnould** and F. Hild. High-cycle fatigue device for low stiffness components. *Experimental Techniques*, 32 :17–25, 2008.
- [A.4] **B. Clair**, **J. Gril**, F. Di Renzo, H. Yamamoto, and F. Quignard. Characterisation of a gel in the cell wall to elucidate the paradoxical shrinkage of tension wood. *Biomacromolecules*, 9 :494–498, 2008.
- [A.5] C.-H. Fang, **B. Clair**, **J. Gril**, and S.-Q. Liu. Growth stresses are highly controlled by the amount of G-layer in poplar tension wood. *IAWA Journal*, 29 :237–246, 2008.
- [A.6] C.-H. Fang, D. Guibal, **B. Clair**, **J. Gril**, Y.-M. Liu, and S.-Q. Liu. Influence of growth stress level on wood properties in Poplar I-69 *Populus deltoides* Bartr.cv."Lux" ex I-69/55. *Annals of Forest Science*, 65 :307–315, 2008.
- [A.7] **D. Jullien** and **J. Gril**. Growth strain assessment at the periphery of small-diameter trees using the two-grooves method : influence of operating parameters estimated by numerical simulations. *Wood Science and Technology*, 42 :551–565, 2008.
- [A.8] Y.N. Nkolo Meze'E, J. Noah Ngamveng, and **S. Bardet**. Effect of enthalpy-entropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods : the case of Bubinga (Guibourtia Tessmanii J. Léonard ; G. Pellegriniana J.L.). *Thermochimica*, 468 :1–5, 2008.
- [A.9] **T. Alméras**, M. Derycke, G. Jaouen, J. Beauchêne, and M. Fournier. Functional diversity in gravitropic reaction among tropical seedlings in relation to ecological and developmental traits. *Journal of Experimental Botany*, 60 :4397–4410, 2009.
- [A.10] **T. Alméras** and M. Fournier. Biomechanical design and long-term stability of trees : Morphological and wood traits involved in the balance between weight increase and the gravitropic reaction. *Journal of Theoretical Biology*, 256 :370–381, 2009.
- [A.11] C.M. Altaner, E.N. Tokareva, J.C.T. Wong, A.I. Hapca, J. P. Mc Lean, and M.C. Jarvis. Measuring compression wood severity in spruce. *Wood Science and Technology*, 43 :279–290, 2009.
- [A.12] N. Amusant, **O. Arnould**, A. Pizzi, A. Depres, **S. Bardet**, R.H. Mansouris, and C. Baudassé. Biological properties of an OSB eco-product manufactured from a mixture of durable and nondurable species and natural resins. *European Journal of Wood Products*, 67 :439–447, 2009.
- [A.13] S. Chang, **B. Clair**, **J. Gril**, H. Yamamoto, and F. Quignard. Deformation induced by ethanol substitution in normal and tension wood of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) and simarouba (*Simarouba amara* Aubl.). *Wood Science and Technology*, 43 :703–712, 2009.

- [A.14] S. Chang, **B. Clair**, J. Ruelle, J. Beauchene, F. Di Renzo, F. Quignard, G.-J. Zhao, H. Yamamoto, and **J. Gril**. Mesoporosity as a new parameter for understanding tension stress generation in trees. *Journal of Experimental Botany*, 60 :3023–3030, 2009.
- [A.15] J. Dlouhá, **B. Clair**, **O. Arnould**, P. Horacek, and **J. Gril**. On the time-temperature equivalency in green wood : Characterisation of viscoelastic properties in longitudinal direction. *Holzforschung*, 63 :327–333, 2009.
- [A.16] J. Dlouhá, **J. Gril**, **B. Clair**, and **T. Alméras**. Evidence and modelling of physical aging in green wood. *Rheologica Acta*, 48 :333–342, 2009.
- [A.17] Y. Horikawa, **B. Clair**, and J. Sugiyama. Varietal difference in cellulose microfibril dimensions observed by infrared spectroscopy. *Cellulose*, 16 :1–8, 2009.
- [A.18] F. Lyon, M.F. Thévenon, A. Pizzi, G. Tondi, A. Depres, **J. Gril**, and S. Rigolet. Wood preservation by a mixed anhydride treatment : A ^{13}C -NMR investigation of simple models of polymeric wood constituents. *Journal of Applied Polymer Science*, 112 :44–51, 2009.
- [A.19] Y. Wang, **J. Gril**, and J. Sugiyama. Variation in xylem formation of *Viburnum odoratissimum* var. awabuki : Growth strain and related anatomical features of branches exhibiting unusual eccentric growth. *Tree Physiology*, 27 :707–713, 2009.
- [A.20] M. Yokoyama, **J. Gril**, M. Matsuo, H. Yano, J. Sugiyama, **B. Clair**, S. Kubodera, T. Mistutani, M. Sakamoto, H. Ozaki, M. Imamura, and S. Kawai. Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings. *Comptes Rendus Physique*, 10 :601–611, 2009.
- [A.21] **O. Arnould**, R. Stürzenbecher, **S. Bardet**, K. Hofstetter, D. Guibal, N. Amusant, and A. Pizzi. Mechanical potential of eco-OSB produced from durable and nondurable species and natural resins. *Holzforschung*, 64 :791–798, 2010.
- [A.22] L. Brancheriau, C. Kouchade, and **I. Brémaud**. Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods. *Journal of Wood Science*, 56 :371–379, 2010.
- [A.23] **I. Brémaud**, P. Cabrolier, **J. Gril**, **B. Clair**, J. Gérard, K. Minato, and **B. Thibaut**. Identification of anisotropic vibrational properties of Padauk wood with interlocked grain. *Wood Science and Technology*, 44 :355–367, 2010.
- [A.24] **I. Brémaud**, K. Minato, P. Langbour, and **B. Thibaut**. Physico-chemical indicators of interspecific variability in vibration damping of wood. *Annals of Forest Science*, 67 :107–114, 2010.
- [A.25] V. Cereser Camara, D. Laux, and **O. Arnould**. Enhanced multiple ultrasonic shear reflection method for the determination of high frequency viscoelastic properties. *Ultrasonics*, 50 :710–715, 2010.
- [A.26] P. R. G. Hein, **B. Clair**, L. Brancheriau, and G. Chaix. Predicting microfibril angle in Eucalyptus wood from different wood faces and surface qualities using near infrared spectra. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 18 :455–464, 2010.
- [A.27] G. Jaouen, M. Fournier, and **T. Alméras**. Thigmomorphogenesis versus light in biomechanical growth strategies of saplings of two tropical rain forest tree species. *Annals of Forest Science*, 67 :211, 2010.
- [A.28] M. Matsuo, M. Yokoyama, K. Umemura, **J. Gril**, K. Yano, and S. Kawai. Color changes in wood during heating : kinetic analysis by applying time-temperature superposition method. *Applied Physics A : Materials Science and Processing*, 99 :47–52, 2010.
- [A.29] K. Minato, Y. Konaka, **I. Brémaud**, S. Suzuki, and E. Obataya. Extractives of *muirapiranga* (*Brosimum* sp.) and its effects on the vibrational properties of wood. *Journal of Wood Science*, 56 :41–46, 2010.
- [A.30] M. Royer, D. Stien, J. Beauchêne, G. Herbette, J. P. Mc Lean, A. Thibaut, and **B. Thibaut**. Chemical extractives of the tropical wood *Wallaba* are natural anti-swelling agents. *Holzforschung*, 64 :211–215, 2010.

- [A.31] Y. Wang, **J. Gril**, **B. Clair**, K. Minato, and J. Sugiyama. Wood properties and chemical composition of the eccentric growth branch of *Viburnum odoratissimum* var. awabuki. *Trees - Structure and Function*, 24 :541 – 549, 2010.
- [A.32] R. Yahya, J. Sugiyama, D. Silsia, and **J. Gril**. Some anatomical features of an *Acacia* hybrid, *A. mangium* and *A. auriculiformis* grown in Indonesia with consideration of pulp yield and paper strength. *Journal of Tropical Forest Science*, 22 :343–351, 2010.
- [A.33] H. Yamamoto, J. Ruelle, Y. Arakawa, M. Yoshida, **B. Clair**, and **J. Gril**. Origin of the characteristic hygro-mechanical properties of the gelatinous layer in tension wood from Kunugi oak (*Quercus acutissima*). *Wood Science and Technology*, 44 :149–163, 2010.
- [A.34] L. Bréchet, S. Ponton, **T. Alméras**, D. Bonal, and D. Epron. Does spatial distribution of tree size account for spatial variation in soil respiration in a tropical forest? *Plant and Soil*, 347 :293–303, 2011.
- [A.35] **I. Brémaud**, N. Amusant, K. Minato, **J. Gril**, and **B. Thibaut**. Effect of extractives on vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.). *Wood Science and Technology*, 45 :461–472, 2011.
- [A.36] **I. Brémaud**, **J. Gril**, and **B. Thibaut**. Anisotropy of wood vibrational properties : dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*, 45 :735–754, 2011.
- [A.37] **B. Clair**, **T. Alméras**, G. Pilate, **D. Jullien**, J. Sugiyama, and C. Riekel. Maturation stress generation in poplar tension wood studied by synchrotron radiation microdiffraction. *Plant Physiology*, 155 :562–570, 2011.
- [A.38] **D. Dureisseix** and B. Marcon. A partitioning strategy for the coupled hygromechanical analysis with application to wood structures of Cultural Heritage. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 88 :228–256, 2011. **.
- [A.39] M. El Mouridi, **T. Laurent**, L. Brancheriau, **O. Arnould**, A. Famiri, A. Hakam, and **J. Gril**. Searching for material symmetries in the burr wood of thuja by a direct contact ultrasonic method on spherical samples. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 13 :285–296, 2011.
- [A.40] E. Fouilhe, G. Goli, A. Houssay, and G. Stoppani. Vibration Modes of the Cello Tailpiece. *archives of acoustics*, 36 :713–726, 2011.
- [A.41] M. Matsuo, M. Yokoyama, K. Umemura, J. Sugiyama, S. Kawai, **J. Gril**, S. Kubodera, T. Mitsutani, H. Ozaki, M. Sakamoto, and M. Imamura. Aging of wood - Analysis of color changing during natural aging and heat treatment. *Holzforschung*, 65 :361–368, 2011.
- [A.42] J. P. Mc Lean, T. Zhang, **S. Bardet**, J. Beauchêne, A. Thibaut, **B. Clair**, and **B. Thibaut**. The decreasing radial wood stiffness pattern of some tropical trees growing in the primary forest is reversed and increases when they are grown in a plantation. *Annals of Forest Science*, 68 :681–688, 2011.
- [A.43] T. Zhang, S.-L. Bai, F. Zhang Yang, and **B. Thibaut**. Viscoelastic properties of wood materials characterized by nanoindentation experiments. *Wood Science and Technology*, 46 :1003–1016, 2011.
- [A.44] T. Zhang, **S. Bardet**, S.-L. Bai, J. Beauchêne, **T. Alméras**, and **B. Thibaut**. Radial Variations of Vibrational Properties of Three Tropical Woods. *Journal of Wood Science*, 57 :377–386, 2011.
- [A.45] **I. Brémaud**. Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones : Biological and cultural diversity. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131 :807–818, 2012.
- [A.46] **I. Brémaud**, **Y. El Kaïm**, D. Guibal, K. Minato, **B. Thibaut**, and **J. Gril**. Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types. *Annals of Forest Science*, 68 :681–688, 2012.
- [A.47] S. Chang, F. Quignard, F. Di Renzo, and **B. Clair**. Solvent polarity and internal stresses control the swelling behavior of green wood during dehydration in organic solution. *Biore-sources*, 7 :2418–2430, 2012.

- [A.48] **B. Clair**. Evidence that release of internal stress contributes to drying strains of wood. *Holzforschung*, 66 :349–353, 2012.
- [A.49] K. De Borst, C. Jenkel, C. Montero, J. Colmars, **J. Gril**, M. Kaliske, and J. Eberhardsteiner. Mechanical characterization of wood : An integrative approach ranging from nanoscale to structure. *Computers and Structures*, 89 :476–484, 2012.
- [A.50] J. Dlouha, **T. Alméras**, and **B. Clair**. Representativeness of wood biomechanical properties measured after storage in different conditions. *Trees - Structure and Function*, 26 :695–703, 2012.
- [A.51] J. Froidevaux, T. Volkmer, C. Ganne-Chédeville, **J. Gril**, and P. Navi. Viscoelastic behaviour of aged and non-aged spruce wood in the radial direction. *Wood Material Science & Engineering*, 7 :1–12, 2012.
- [A.52] P. R. G. Hein, J.-M. Bouvet, E. Mandrou, P. Vigneron, **B. Clair**, and G. Chaix. Age trends of microfibril angle inheritance and their genetic and environmental correlations with growth, density and chemical properties in Eucalyptus urophylla S.T. Blake wood. *Annals of Forest Science*, 68 :681–688, 2012.
- [A.53] P. R. G. Hein, T. Lima José, **J. Gril**, A.M. Rosado, and L. Brancheriau. Resonance of scantlings indicates the stiffness even of small specimens of Eucalyptus from plantations. *Wood Science and Technology*, 45 :461–472, 2012.
- [A.54] R. Longo, T. Delaunay, D. Laux, M. El Mouridi, **O. Arnould**, and E. Le Clezio. Wood elastic characterization from a single sample by resonant ultrasound spectroscopy. *Ultrasonics*, 52 :971–974, 2012.
- [A.55] E. L. Longui, **I. Brémaud**, F. G. Da Silva Junior, D. R. Lombardi, and E. Segala Alves. Relationship among extractive, lignin and holocellulose contents with performance index of seven wood species used for bows of stringed instruments. *IAWA Journal*, 33 :141–149, 2012.
- [A.56] B. Marcon, P. Mazzanti, L. Uzielli, L. Cocchi, D. Dureisseix, and **J. Gril**. Mechanical study of a support system for cupping control of panel paintings combining crossbars and springs. *Journal of Cultural Heritage*, 13 :5109–5117, 2012.
- [A.57] J. P. Mc Lean, **O. Arnould**, J. Beauchêne, and **B. Clair**. The effect of the G-Layer on the viscoelastic properties of tropical hardwoods. *Annals of Forest Science*, 69 :399–408, 2012.
- [A.58] C. Montero, **B. Clair**, **T. Alméras**, A. Van Der Lee, and **J. Gril**. Relationship between wood elastic strain under bending and cellulose crystal strain. *Composites Science and Technology*, 72 :175–181, 2012.
- [A.59] C. Montero, **J. Gril**, C. Legeas, D. G. Hunt, and **B. Clair**. Influence of hygromechanical history on the longitudinal mechanosorptive creep of wood. *Holzforschung*, 66 :757–764, 2012.
- [A.60] M. Royer, A.M. S. Rodrigues, G. Herbette, J. Beauchêne, M. Chevalier, B. Hérault, **B. Thibaut**, and D. Stien. Efficacy of Bagassa guianensis Aubl. extract against wood decay and human pathogenic fungi. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 70 :55–59, 2012.
- [A.61] A. Se Golpayegani, **I. Brémaud**, **J. Gril**, M.-F. Thévenon, **O. Arnould**, and K. Pourtahmasi. Effect of extractions on dynamic mechanical properties of white mulberry (*Morus alba*). *Journal of Wood Science*, 58 :153–162, 2012.
- [A.62] L. Uzielli, L. Cocchi, P. Mazzanti, M. Togni, **D. Jullien**, and P. Dionisi-Vici. The deformometric kit : a method and an apparatus for monitoring the deformation of wooden panels. *Journal of Cultural Heritage*, page Voir DOI, 2012.
- [A.63] L. Uzielli and **J. Gril**. Wood science and conservation : activities and achievements of COST Action IE0601. *Journal of Cultural Heritage*, 13 :S1–S5, 2012.
- [A.64] D. Bourreau, Y. Aimene, J. Beauchêne, and **B. Thibaut**. Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71 :653–662, 2013.

- [A.65] **I. Brémaud**, J. Ruelle, A. Thibaut, and **B. Thibaut**. Changes in viscoelastic vibrational properties between compression and normal wood : roles of microfibril angle and of lignin. *Holzforschung*, page voir DOI, 2013.
- [A.66] M. Eder, **O. Arnould**, J. W. C. Dunlop, J. Hornatowska, and L. Salmén. Experimental micromechanical characterisation of wood cell walls. *Wood Science and Technology*, 45 :461–472, 2013.
- [A.67] **D. Jullien**, R. Widmann, C. Loup, and **B. Thibaut**. Relationship between tree morphology and growth stress in mature European beech stands. *Annals of Forest Science*, 68 :681–688, 2013.
- [A.68] A. Kutnar, R. Widmann, and **I. Brémaud**. Preliminary studies for use of dynamic mechanical analysis (DMA) to verify intensity of thermal wood modifications. *International Wood Products Journal*, 4 :158–165, 2013.

Participations à un ouvrage

- [B.1] M. Fournier, B. Moullia, and **J. Gril**. La biomécanique des plantes ou " Comment les plantes tiennent debout ? ". In *Aux Origines des Plantes*, pages 228–239. Fayard/Arthème, 2008.
- [B.2] **J. Gril**. *Wood science for conservation of cultural heritage*. Florence University Press, 2010.
- [B.3] **S. Bardet**, **J. Gril**, and K. Kojiro. Thermal Strain of Green Hinoki Wood : Separating the Hygrothermal Recovery and the Reversible Deformation. In *Models and Methods in Civil Engineering, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*, page 6. Springer verlag, 2012.
- [B.4] **J. Gril**. *Wood science and conservation*. Elsevier, 2012.

Communications avec actes dans des colloques

- [C1.1] J. Dlouha, **B. Clair**, and **J. Gril**. Modélisation du vieillissement physique dans le bois vert. In *Actes du 43ème colloque du Groupement Français de Rhéologie*, page 4p., Palaiseau, France, 2008.
- [C1.2] **T. Alméras**, **B. Clair**, and **J. Gril**. The origin of maturation stress in tension wood : using a wide range of observations to assess hypothetic mechanistic models. In *sans titre*, pages 105–106, Vienna, Autriche, 2009.
- [C1.3] **T. Alméras** and M. Fournier. The gravitropic control of woody stems orientation : biomechanical parameters involved and consequences for stem allometry. In *Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference*, pages 314–321, Cayenne, France, 2009.
- [C1.4] **O. Arnould**. Nanoindentation and Atomic Force Microscopy basic principles. In *COST FP0802 Spring School Lecture Notes. 7-10 Mai 2009. Vienne (Autriche)*, page 12p, Vienne, Autriche, 2009.
- [C1.5] **I. Brémaud**, K. Minato, and **B. Thibaut**. Mechanical damping of wood as related to species classification : a preliminary survey. In *6th Plant Biomechanics Conference PBM09*, pages 536–542, Cayenne, Guyane Française, 2009.
- [C1.6] K. Bytebier, **O. Arnould**, and R. Arinero. Mechanical characterization of wood viscoelasticity at the submicrometre scale. In *COST FP0802 Workshop on "Experimental and computational methods in wood micromechanics"*, pages 93–94, Vienne, Autriche, 2009.
- [C1.7] K. Bytebier, **O. Arnould**, R. Arinero, **B. Clair**, and **T. Alméras**. Nanomechanical characterization of wood cell walls during maturation process. In *6th Plant Biomechanics Conference. 16-21 nov. 2009. Cayenne (Guyane Française).*, pages 228–235, Cayenne, France, 2009.
- [C1.8] **B. Clair**, **T. Alméras**, G. Pilate, **D. Jullien**, J. Sugiyama, and C. Riekel. Stress of cellulose network in tension wood is induced shortly after cellulose deposition. In *Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference*, pages 236–243, Cayenne, France, 2009.

- [C1.9] **B. Clair**, **T. Alméras**, G. Pilate, **D. Jullien**, J. Sugiyama, and C. Riekel. Maturation stress generation starts before the formation of the G-layer in poplar tension wood. In *Proceedings of the COST E50 final conference Systems Biology for Plant Design*, page 2p., Pays-Bas, 2009.
- [C1.10] J. Colmars, B. Marcon, E. Maurin, R. Remond, F. Morestin, P. Mazzanti, and **J. Gril**. Hygromechanical response of a panel painting in a church, monitoring and computer modeling. In *Proceedings of the International conference on wooden cultural heritage, Evaluation of deterioration and management of change*, page 9p., Allemagne, 2009.
- [C1.11] J. Dlouha, **T. Alméras**, **B. Clair**, and **J. Gril**. About structural determinants of the diversity of vibration properties of ten tropical hardwoods. In *6th Plant Biomechanics Conference. 16-21 nov. 2009. Cayenne (Guyane Française).*, pages 543–548, Cayenne, France, 2009.
- [C1.12] **D. Jullien**, **T. Alméras**, M. Kojima, H. Yamamoto, and P. Cabrolier. Evaluation of growth stress profiles in tree trunks : comparison of experimental results to a biomechanical model. In *Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference*, pages 75–82, Cayenne, France, 2009.
- [C1.13] P. Mateille, S. Coussy, **L. Daridon**, **O. Arnould**, A. Fanget, and E. Lapebie. Mise en œuvre expérimentale d'impacts basse vitesse sur matériau énergétique. In *19e Congrès Français de Mécanique. 24-28 Aout 2009. Marseille (France)*, page CDRom 6p, Marseille, France, 2009.
- [C1.14] P. Mateille, **L. Daridon**, **O. Arnould**, A. Fanget, and G. Contesse. Mesoscale Analysis of dynamic loading and their physical consequences on a propellant : numerical and mechanical modelisations issues. In *Groupe de travail MécaDymat Comportement et rupture des matériaux sous sollicitations dynamiques*, page 7 p., Bourges, France, 2009.
- [C1.15] M. Matsuo, M. Yokoyama, K. Umemura, J. Sugiyama, S. Kawai, **J. Gril**, K. Yano, S. Kubodera, T. Mitsutani, H. Ozaki, M. Sakamoto, and M. Imamura. Evaluation of the aging wood from historical buildings as compared with the accelerated aging wood and cellulose, Analysis of color properties. In *Proceedings of the International conference on wooden cultural heritage, Evaluation of deterioration and management of change*, page 6p., Allemagne, 2009.
- [C1.16] J. P. Mc Lean, **O. Arnould**, J. Beauchêne, and **B. Clair**. The viscoelastic properties of some guyanese woods. In *6th Plant Biomechanics Conference.*, pages 499–505, Cayenne, France, 2009.
- [C1.17] N. Rowe, L. Ménard, **B. Clair**, G. Mühlen, and D. Mckey. Evolution of the mechanical architecture during domestication in manioc (cassava). In *Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference*, pages 469–476, Cayenne, France, 2009.
- [C1.18] Y. Wang, **J. Gril**, and J. Sugiyama. Is the branch of *Viburnum odoratissimum* var. *awabuki* reaction wood? Unusual eccentric growth and various distributions of growth strain. In *Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference*, pages 328–334, France, 2009.
- [C1.19] H. Yamamoto, J. Ruelle, Y. Arakawa, M. Yoshida, **B. Clair**, and **J. Gril**. Origins of abnormal behaviors of gelatinous layer in tension wood fiber - A micromechanical approach. In *Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference*, pages 297–305, Guyane Française, 2009.
- [C1.20] M. Yokoyama, **J. Gril**, M. Matsuo, H. Yano, J. Sugiyama, **B. Clair**, S. Kubodera, T. Mitsutani, M. Sakamoto, and H. Ozaki. Mechanical characteristics of aged Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) wood from Japanese historical buildings. In *Proceedings of the International conference on wooden cultural heritage, Evaluation of deterioration and management of change*, page 8p., Allemagne, 2009.
- [C1.21] **I. Brémaud**, P. Cabrolier, K. Minato, J. Gérard, and **B. Thibaut**. Vibrational properties of tropical woods with historical uses in musical instruments. In *Proceedings of the International Conference of COST Action IE0601 Wood Science for the Preservation of Cultural Heritage*, pages 17–23, Braga, Portugal, 2010.
- [C1.22] J. Colmars, T. Nakano, H. Yano, and **J. Gril**. Creep properties of heat treated wood in radial direction. In *Proceedings of the Joint meeting of COST Action IE0601 WoodCultHer Wood Science for Conservation of Cultural Heritage, and the European Society of Wood Mechanics*, pages 24–29, Portugal, 2010.

- [C1.23] M. El Mouridi, **T. Laurent**, L. Brancheriau, **O. Arnould**, and **J. Gril**. Mise au Point d'une Méthode Ultrasonore par Contact Direct sur des Echantillons Sphériques : Contribution à la détermination des symétries matérielles d'un matériau. In *10ème Congrès Français d'Acoustique*, page 6p., Lyon, France, 2010.
- [C1.24] J. Froidevaux, M. Müller, R. Kuhnen, M. Fioravanti, L. Uzielli, **J. Gril**, and P. Navi. 3D modeling of hydal deformation of panel paintings and its confirmation by the experiments. In *Proceedings of the 4th International Conference of COST Action IE0601 'Interaction between Wood Science and Conservation of Cultural Heritage'*, page 6p., Izmir, Turquie, 2010.
- [C1.25] **J. Gril**. Contribution of mechanical engineering to the conservation of panel paintings : the case of Mona Lisa. In *Proceedings of the French-Japanese Workshop on Science for Conservation of Cultural Heritage*, page 12p., France, 2010.
- [C1.26] B. Marcon, **D. Dureisseix**, P. Dionisi-Vici, **J. Gril**, and L. Uzielli. Experimental and numerical mechanical study of a framing technique for cupping control of painted panels combining crossbars and springs. In *Proceedings of the International Conference on Wood Science for Preservation of Cultural Heritage : Mechanical and Biological Factors*, pages 219–224, Braga, Portugal, 2010.
- [C1.27] C. Montero, **J. Gril**, and **B. Clair**. Interaction between mechanosorptive and viscoelastic response of wood at high humidity level. In *Proceedings of 14th International Conference on Experimental Mechanics, Poitiers*, page 6p., Poitiers, France, 2010.
- [C1.28] M. Yokoyama, **J. Gril**, M. Matsuo, H. Yano, J. Sugiyama, S. Kubodera, T. Mistutani, M. Sakamoto, M. Imamura, and S. Kawai. Mechanical characteristics of aged Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) wood from Japanese historical buildings . In *Proceedings of the International Conference of COST Action IE0601 'Interaction between Wood Science and Conservation of Cultural Heritage'*, page 6p., Turquie, 2010.
- [C1.29] **O. Arnould**, K. Bytebier, P. Cabrolier, and R. Arinero. Nanomechanical Characterisation of the Wood Cell Wall Using Atomic Force Microscopy. In *Actes du colloque MECAMAT Aussois 2011*, pages Cd–Rom 8p., France, 2011.
- [C1.30] T. Delaunay, D. Laux, **O. Arnould**, and T. Almeras. Full elastic characterization of wood materials by Resonant Ultrasound Spectroscopy. In *Acoustics 2012 Nantes*, Nantes, France, 2012.
- [C1.31] E. Foulhe, A. Houssay, and **I. Brémaud**. Dense and hard woods in musical instrument making : Comparison of mechanical properties and perceptual "quality" grading. In *Acoustics 2012 Nantes*, pages 1–6, Nantes, France, 2012.
- [C1.32] **J. Gril**. La Joconde, sa conservation préventive, le rôle essentiel joué par des chercheurs montpelliérains. In *Bulletin des Séances publiques de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier*, page 8p., France, 2012.
- [C1.33] **I. Brémaud** and N. Poidevin. Approches culturelles et mécaniques dans le choix des bois en facture : cas des archets anciens. In *La musique et ses instruments / Music and its instruments*, pages 1–19, Paris, France, 2013.

Communications sans actes dans des colloques

- [C2.1] **T. Alméras**. Approche multiéchelle du comportement mécanique du bois. In *Tree acclimation meeting*, France, 2008.
- [C2.2] **T. Alméras**, J. Dlouha, and **J. Gril**. Modélisation des contraintes de croissance dans une section de tige : prise en compte de l'hétérogénéité et de la viscoélasticité. In *11èmes réunions Croissance, Amélioration et Qualité*, France, 2008.
- [C2.3] **T. Alméras** and M. Fournier. Relations entre croissance, flexion sous le poids propre et réaction gravitropique : un modèle synthétique et son application à une diversité d'espèces tropicales dans le cadre du projet Woodiversity. In *11èmes réunions Croissance, Amélioration et Qualité*, France, 2008.

- [C2.4] **I. Brémaud**. Entre biodiversité, cultures et acoustique : Recensement et analyse des espèces, propriétés et usages des bois d'instruments de musique du Monde. In *Séminaire invité au Musée Royal de l'Afrique Centrale*, Tervuren, Belgique, 2008.
- [C2.5] **I. Brémaud** and P. Cabrolier. Introduction aux sciences du bois en lien avec la lutherie. In *Rencontres professionnelles Sainte Cécile de l'ALADFI*, St Germain au Mont d'Or, France, 2008.
- [C2.6] **I. Brémaud** and N. Poidevin. Caractéristiques physiques du Pernambouc et des bois d'archèterie. In *Rencontres professionnelles Sainte Cécile de l'ALADFI*, St Germain au Mont d'Or, France, 2008.
- [C2.7] S. Chang, **B. Clair**, **J. Gril**, and **T. Alméras**. Deformation induced by ethanol substitution in normal and tension wood of chestnut and simarouba. In *COST E50 Workshop "Characterisation and application of cell wall macromolecules*, Suisse, 2008.
- [C2.8] J. Dlouha and **T. Alméras**. Contraintes de croissance et flexibilité des tiges. In *Tree acclimation meeting*, France, 2008.
- [C2.9] **J. Gril**. Comportement hygromécanique du bois. In *'Bois et facture instrumentale : ré-glementation, propriétés et sélection des bois de lutherie'*, Journées Professionnelles *Facture Instrumentale et Sciences à l'ITEMM*, France, 2008.
- [C2.10] **J. Gril**. Modelling the hygromechanics of wooden panel paintings from the cultural heritage. In *Wood Matters - A celebration of the work of John Barnett*, The Linnean Society of London, International Academy of Wood Science, International Association of Wood Anatomists, Royaume-Uni, 2008.
- [C2.11] **J. Gril** and P. Perré, P. Hygromechanical behaviour of painted wooden panels from the cultural heritage, the Mona Lisa wooden support. In *'Mechanical Modeling of Wood and Wood Based Materials'*, mini-symposium WCCM8 - ECCOMAS, Italie, 2008.
- [C2.12] H. Yamamoto, **J. Gril**, and **T. Alméras**. A multi-scale analysis of wood physical properties by the reinforced-matrix principle : formulation by Mori-Tanaka theory. In *Mechanical Modeling of Wood and Wood Based Materials*, mini-symposium WCCM8 - ECCOMAS, Italie, 2008.
- [C2.13] **T. Alméras**, **B. Clair**, and **J. Gril**. Modélisation biomécanique de la genèse des précontraintes dans le bois. In *19e Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, 2009.
- [C2.14] **T. Alméras**, **B. Clair**, and **J. Gril**. The origin of maturation stress in tension wood : using a micro-mechanical model to discriminate between hypothetic mechanism. In *COST E50 final conference Systems Biology for Plant Design*, Pays-Bas, 2009.
- [C2.15] **T. Alméras** and T. Fourcaud. Concepts of tree growth and biomechanics that could be considered in future models of tree stability. In *Workshop Tree Stability*, France, 2009.
- [C2.16] **O. Arnould**, N. Amusant, **S. Bardet**, A. Depres, R.H. Mansouris, A. Pizzi, and C. Baudasse. Etude de la faisabilité de panneaux OSB écologiques naturellement durables. In *19ème Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, 2009.
- [C2.17] **S. Bardet**, J. P. Mc Lean, and **O. Arnould**. Comportement viscoélastique des bois de Guyane. In *22e Congrès sur la Déformation des Polymères Solides*, DEPOS, La Colle sur Loup, France, 2009.
- [C2.18] **I. Brémaud**. Propriétés vibratoires viscoélastiques des bois en direction axiale : distributions et analyses sur 450 espèces ligneuses. In *19ème Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, 2009.
- [C2.19] K. Bytebier, **O. Arnould**, R. Arinero, **B. Clair**, and **T. Alméras**. Caractérisation nanomécanique des parois cellulaires du bois à différents stades de leur différenciation. In *19e Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, 2009.
- [C2.20] **B. Clair**, **T. Alméras**, G. Pilate, **D. Jullien**, J. Sugiyama, and C. Riekkel. Mise en évidence de la mise en tension de la cellulose pendant la maturation cellulaire. In *19e Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, 2009.

- [C2.21] **B. Clair**, S. Chang, F. Di Renzo, F. Quignard, and **J. Gril**. Internal stresses change the swelling properties of tension wood in organic solvents. In *COST E50 Workshop "Reaction wood formation at stand, tree and cellular level"*, Nancy, France, 2009.
- [C2.22] **D. Dureisseix** and B. Marcon. A partitioning algorithm to couple diffusion and elasticity for the simulation of hygromechanical wood structures of Cultural Heritage. In *10th US National Congress on Computational Mechanics - USNCCM10*, Columbus, États-Unis, 2009.
- [C2.23] M. Fournier, G. Jaouen, E. Duchateau, **B. Clair**, C. Coutand, and **T. Alméras**. Gravitropism plays a key role in the diversity of tree ecological strategies at the advance regeneration stage. A case study in the French Guiana tropical rainforest. In *6th Plant Biomechanics Conference*, Cayenne, France, 2009.
- [C2.24] **J. Gril**, M. Yokoyama, M. Matsuo, and S. Kawai. Interprétation du comportement mécanique de bois de temples japonais : Comment corriger les disparités de densité? In *19ème Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, 2009.
- [C2.25] **J. Gril**, M. Yokoyama, M. Matsuo, K. Umemura, **B. Clair**, J. Sugiyama, T. Mitsutani, S. Kubodera, H. Ozaki, M. Sakamoto, M. Imamura, and S. Kawai. On the aging of Hinoki wood from the Japanese cultural heritage. In *IAWS 2009 - Forests as a renewable source of vital values for changing world*, Saint Pétersbourg, Moscou, Russie, Fédération De, 2009.
- [C2.26] T. Iburi, **J. Gril**, and J. Sugiyama. Dynamic bending modulus of a single fiber estimated by electrostatic vibration method. In *16th Annual meeting of the Japanese Cellulose Research Society*, Hokkaido, Japon, 2009.
- [C2.27] T. Iburi, T. Mitani, **J. Gril**, and J. Sugiyama. Dynamic bending modulus of a single fiber estimated by electrostatic vibration method. In *59th Annual meeting of the Japanese Wood Research Society*, Matsumoto, Japon, 2009.
- [C2.28] G. Jaouen, E. Duchâteau, **T. Alméras**, **B. Clair**, and M. Fournier. Reaction wood efficiency in control of trunk verticality. In *COST E50 Workshop : Reaction wood formation at stand, tree and cellular level*, France, 2009.
- [C2.29] F. Lyon, M.-F. Thévenon, A. Pizzi, and **J. Gril**. Resistance to decay fungi of ammonium borate oleate treated wood. In *40th Annual Meeting of of the International Research Group on Wood Protection*, Pékin, Chine, 2009.
- [C2.30] B. Marcon, **D. Dureisseix**, **F. Dubois**, and **D. Jullien**. Couplage de codes en thermo-hygromécanique pour les panneaux peints en bois du patrimoine. In *19e Congrès Français de Mécanique - CFM09*, Marseille, France, 2009.
- [C2.31] P. Mateille, **L. Daridon**, **O. Arnould**, A. Fanget, and G. Contesse. Mesoscale Analysis of dynamic loading and their physical consequences on a propellant : numerical and mechanical modelisations issues. In *9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading - DYMAT 2009*, Bruxelles, Belgique, 2009.
- [C2.32] P. Mateille, **L. Daridon**, **O. Arnould**, A. Fanget, and G. Contesse. Mesoscale Analysis of dynamic loading and their physical consequences on a propellant : numerical and mechanical modelisations issues. In *XI Khariton's Topical Scientific Readings International Conference : Extreme States of Substance. Det*, Sarov, Russie, Fédération De, 2009.
- [C2.33] C. Montero and **B. Clair**. Comportement de la cellulose lors d'essais de flexion sur échantillons macroscopiques de bois. In *19e Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, 2009.
- [C2.34] C. Montero, **B. Clair**, and A. Van Der Lee. Nanostructural investigations of cellulose deformation by X-ray diffraction. In *COST FP0802 Workshop on "Experimental and computational methods in wood micromechanics"*, Vienna, Autriche, 2009.
- [C2.35] Y. Wang, **J. Gril**, and J. Sugiyama. Growth strain of the branches exhibiting unusual eccentric growth in *Viburnum odoratissimum* var. *awabuki*. In *59th Annual Meeting of the Japan Wood Research Society*, Matsumoto, Japon, 2009.
- [C2.36] **T. Alméras**, A. Gronvold, **D. Jullien**, and A. Van Der Lee. X-Ray diffraction study of wood cellulose behaviour during drying. In *Workshop "Wood Structure/Function-Relationships"*, Hamburg, Allemagne, 2010.

- [C2.37] **O. Arnould**, K. Bytebier, and R. Arinero. Caractérisation nano-mécanique de la paroi cellulaire du bois par Microscopie à Force Atomique. In *DEPOS 23*, France, 2010.
- [C2.38] **I. Brémaud**. Propriétés vibratoires des bois : sources de variabilité et caractérisation de bois de lutherie. In *Département Mécanique Appliquée, Institut FEMTO ST*, Besançon, France, 2010.
- [C2.39] **I. Brémaud**. Wood science approaches to musical instrument making as an intangible cultural heritage : mechanical, versus " traditionnal knowledge ", assessments of " suitable " wood species and wood pieces. In *4th International Conference of COST Action IE061. Interaction between Wood Science and Conservation of Cultural Heritage*, Izmir, Turquie, 2010.
- [C2.40] J. Colmars, **D. Dureisseix**, and **J. Gril**. A 1Dx2D model to simulate the hygromechanical response of panel paintings. In *4th International Conference of COST Action IE0601 : Interaction between Wood Science and Conservation of Cultural Heritage*, Izmir, Turquie, 2010.
- [C2.41] J. Colmars, **J. Gril**, and L. Uzielli. Hygromechanical response of a panel painting in a church : in-situ monitoring and computer modeling. In *Joint meeting of cost actions IE0601 'Wood Science for Cultural Heritage' and FP0802 'Experimental and Computational Micro-Characterisation Techniques in Wood Mechanics'*, Pologne, 2010.
- [C2.42] C. Coutand, M. Fournier, **T. Alméras**, G. Jaouen, and B. Moulia. Biomechanics of habit and plants strategies of growth in height : environmental constraints, regulator processes and traits. In *Colloque Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture et des Ecosystèmes*, France, 2010.
- [C2.43] M. El Mouridi, **T. Laurent**, L. Brancheriau, **J. Gril**, **O. Arnould**, and A. Farimi. Recherche des symétries matérielles du bois de la loupe de thuya par une méthode ultrasonore par contact direct sur des échantillons sphériques. In *Joint International Workshop IAWS/ESTB7 : Wood and derivatives - Sustainable materials and derivatives for future needs*, Maroc, 2010.
- [C2.44] **J. Gril**. Comportement hygromécanique des panneaux en bois peint du patrimoine. In *Séminaire Jean Le Rond d'Alembert, Univ. Paris 6*, Paris, France, 2010.
- [C2.45] **J. Gril** and J. Colmars. Analysing the hygromechanical behaviour of painted panels using various models. In *4th International Conference of COST Action IE0601 "Interaction between Wood Science and Conservation of Cultural Heritage"*, Izmir, Turquie, 2010.
- [C2.46] **J. Gril**, J. Colmars, and P. Mazzanti. Time-dependent mechanical behaviour of wood and implication for painted panels. In *Joint meeting of cost actions IE0601 'Wood Science for Cultural Heritage' and FP0802 'Experimental and Computational Micro-Characterisation Techniques in Wood Mechanics'*, Pologne, 2010.
- [C2.47] J.-M. Husson, **J. Gril**, **F. Dubois**, and N. Sauvat. Hygro-locks modelling of the mechano-sorptive behavior based on integral formulation or internal variables. In *ECCM 2010, IV European Conference on Computational Mechanics*, France, 2010.
- [C2.48] C. Montero, **B. Clair**, **T. Alméras**, and A. Van Der Lee. X-ray diffraction use for nanostructural investigation of wood cellulose deformation. In *Experimental and Computational Micro-Characterization techniques in Wood Mechanics*, Hamburg, Allemagne, 2010.
- [C2.49] P. Darabi, M.-F. Thévenon, **J. Gril**, and A. N. Karimi. Photodégradation de composites constitués de polyéthylène haute densité et de bagasse délignifiée. In *Groupe de travail 'Eco-matériaux' Amac/Mecatmat*, Lyon, France, 2011.
- [C2.50] M. El Mouridi, **T. Alméras**, **T. Laurent**, **O. Arnould**, A. Hakam, and **J. Gril**. Determination of the thuja burr material symmetries by direct contact ultrasonic method on spherical specimens. In *COST FP0802 Workshop Mixed numerical and experimental methods applied to the mechanical characterization of bio-based materials*, Portugal, 2011.
- [C2.51] J. Froidevaux, T. Volkmer, **J. Gril**, M. Fioravanti, and P. Navi. Comparison between accelerated thermo-hydro aged wood and naturally aged wood. In *1st Workshop of COST Action FP0904 'Mechano-Chemical transformations of wood during Thermo-Hydro-Mechanical processing'*, Bienne, Suisse, 2011.

- [C2.52] **J. Gril** and J. Dik. Wood technology ; research methodologies and techniques in the field of wood technology. In *Expert meeting to develop a research agenda for the structural conservation of panel paintings and related works of art*, Pays-Bas, 2011.
- [C2.53] A. Gronvold, **T. Alméras**, C. Montero, **B. Clair**, and A. Van Der Lee. Multiscale investigation of wood behavior after the elastic domain using X-Ray diffraction. In *Hierarchical structure and mechanical characterisation of Wood*, Helsinki, Finlande, 2011.
- [C2.54] M. Matsuo, **J. Gril**, M. Yokoyama, K. Umemura, and S. Kawai. Modelling of colour change induced by aging and heat treatment by using the multi-process kinetic analysis. In *1st Workshop of COST Action FP0904 'Mechano-Chemical transformations of wood during Thermo-Hydro-Mechanical processing'*, Bienne, Suisse, 2011.
- [C2.55] C. Montero, **B. Clair**, and **J. Gril**. Interaction between long term viscoelastic and mechano-sorptive response of wood. In *COST FP0904 'Thermo-hydro-mechanical Wood behaviour and processing'*, Biel, Suisse, 2011.
- [C2.56] **T. Alméras**, J. Dlouha, **D. Jullien**, and **J. Gril**. The bending mechanics of tree stems : the key role of wood maturation stress for resisting both permanent and temporary loads. In *7th Plant Biomechanics Conference*, Clermont-Ferrand, France, 2012.
- [C2.57] **T. Alméras**, **J. Gril**, and **B. Clair**. The origin of maturation stress in tension wood : using a wide range of observations and mechanical considerations to discriminate between hypothetical mechanisms. In *7th Plant Biomechanics Conference*, Clermont-Ferrand, France, 2012.
- [C2.58] **O. Arnould** and T. Cuberes. Mechanical characterization of the wood cell wall by RC-AFM and UFM : sample preparation and comparison of data. In *Workshop COSTFP0802 : Micro-characterisation of wood materials and properties*, Royaume-Uni, 2012.
- [C2.59] **I. Brémaud**. Mécanique des bois et du roseau en lien avec la facture instrumentale. In *Journées professionnelles Fracture Instrumentale & Sciences JFIS - Instruments à vent : anches, instruments anciens et innovation*, ITEM, Le Mans, France, 2012.
- [C2.60] **I. Brémaud**, J. Gérard, **J. Gril**, and **B. Thibaut**. Exploring the diversity in wood (dynamic) mechanical properties : What can we learn on affecting factors and on potential utilisations? In *2012 IUFRO all Division 5 Meeting*, Lisbonne, Portugal, 2012.
- [C2.61] S. Chang, L. Salmén, A.-M. Olsson, and **B. Clair**. Deposition and organization of cell wall polymers during tension wood cell wall maturation studied by FTIR microspectroscopy. In *7th Plant Biomechanics International Conference*, Clermont-Ferrand, France, 2012.
- [C2.62] **B. Clair**, J. Alteyrac, **T. Alméras**, A. Gronvold, J. Espejo, J.-P. Lasserre, and L. Valenzuela. Longitudinal and tangential maturation stresses in Eucalyptus plantation trees. In *7th Plant Biomechanics Conference*, Clermont-Ferrand, France, 2012.
- [C2.63] P. Darabi, **J. Gril**, A. Karim, and M.-F. Thévenon. Effect of Using Delignified Fibers on Mechanical Properties of High Density Polyethylene Composite Filled with Bagasse Before and After Accelerated Weathering. In *IUFRO - All Division 5 Conference*, Estoril, Portugal, 2012.
- [C2.64] P. Darabi, A. Naghi Karimi, M.-F. Thévenon, and **J. Gril**. Evaluation of High Density Polyethylene composite filled with Bagasse after Accelerated weathering follow by biodegradation. In *International Conference on Biobased Materials and Composites (ICBMC'12)*, Marrakech, Maroc, 2012.
- [C2.65] M. Eder, **O. Arnould**, J. Hornatowska, J. W. C. Dunlop, and L. Salmén. Experimental micromechanical characterization of wood cell walls. In *Workshop COSTFP0802 : Micro-characterisation of wood materials and properties*, Royaume-Uni, 2012.
- [C2.66] M. Fournier, T. Constant, B. Moulia, and **T. Alméras**. Gravitropic movements in trees are constrained by size and growth rate and make cambial growth a carbon sink during sapling stages. In *7th Plant Biomechanics Conference*, Clermont-Ferrand, France, 2012.
- [C2.67] J. Graindorge Lamour, **D. Jullien**, A. Rouard, C. Gauvin, and **J. Gril**. Aide à la décision à chaque étape de la restauration, comparaison du comportement hygromécanique de deux renforts : deux doublages en balsa. In *1ères Journées du GDR Bois*, France, 2012.

- [C2.68] **J. Gril**. Why do we need to accelerate wood aging? In *Modelling the isolated and combined effects of thermal modifications and hygrothermomechanical loading of wood, focused meeting of COST Action FP0904 'Thermo-Hydro-Mechanical Wood Behaviour and Processing'*, France, 2012.
- [C2.69] **J. Gril**, **D. Jullien**, and **T. Alméras**. Longitudinal growth stresses in trees : analytical models and functional implications. In *7th Plant Biomechanics Conference*, Clermont-Ferrand, France, 2012.
- [C2.70] A. Gronvold, **B. Clair**, C. Montero, and **T. Alméras**. Etude multi-échelle du comportement élastique du bois à différents taux d'humidité. In *1ères journées du GdR Bois*, Montpellier, France, 2012.
- [C2.71] A. Gronvold, **B. Clair**, C. Montero, and **T. Alméras**. Functional micro-mechanics of plant tissues : assessing the contribution of cellulose to the mechanical behaviour of wood. In *7th Plant Biomechanics Conference*, Clermont-Ferrand, France, 2012.
- [C2.72] A. Gronvold, **B. Clair**, C. Montero, A. Van Der Lee, and **T. Alméras**. Multiscale investigation of wood viscoelastic behavior using X-Ray diffraction technique. In *COST FP0802 Workshop 'Micro Characterisation of Wood Material'*, Edimbourg, Royaume-Uni, 2012.
- [C2.73] **D. Jullien**, P. Mazzanti, L. Cocchi, J. Colmars, **J. Gril**, and L. Uzielli. New uses and improvements of the Deformometric Kit to support study and conservation of panel paintings. In *IUFRO, All Division 5 Conference*, Estoril, Portugal, 2012.
- [C2.74] P. Videcoq, C. Assor, **O. Arnould**, A. Barbacci, and M. Lahaye. Enzymatic investigation of plant cell wall mechanical properties. In *7th Plant Biomechanics Conference*, France, 2012.
- [C2.75] **I. Brémaud**. Propriétés mécaniques dynamiques des bois : caractérisation, sources de variations, applications en lutherie. In *Séminaire au Laboratoire Vibrations Acoustique*, Lyon, France, 2013.

Conférences invitées

- [I.1] **J. Gril**. Time-dependent behaviour of wood and tree biomechanics. In *6th Plant Biomechanics Conference*, Guyane Française, 2009.
- [I.2] **J. Gril**. Wood Culture and Science VIII. In *Monitoring and conservation of wooden cultural heritage, the case Mona Lisa*, Japon, 2009.
- [I.3] **J. Gril**. Mechanics of painted wooden panels from the cultural heritage : the case of Mona Lisa. In *Mechanics of painted wooden panels from the cultural heritage : the case of Mona Lisa*, Allemagne, 2011.
- [I.4] **B. Thibaut**. Xylogologie, un discours sur le bois. In *1eres Journées du GDR 3544 Sciences du Bois*, France, 2012.

Rapports de recherche

- [R.1] **I. Brémaud** and **J. Gril**. Étude du vieillissement du bois dans les instruments de musique dans une optique de conservation préventive. Effet de l'âge et des contraintes mécaniques et hygrothermiques appliquées en fonction des conditions de jeu. 1er rapport d'étape. R.
- [R.2] **D. Dureisseix**, B. Marcon, J. Colmars, and **J. Gril**. Étude sur la conservation préventive des panneaux de bois peints. R.

HDR

- [H.1] **B. Clair**. *Enquête sur le comportement paradoxal du bois de tension*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, September 2009.

Thèses

- [T.1] K. Bytebier. *Etude du comportement mécanique de la paroi cellulaire du bois par Microscopie à Force Atomique*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2009.
- [T.2] J. Dlouha. *Comportement viscoélastique longitudinal du bois vert : diversité et prédiction à long terme*. PhD thesis, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, July 2009.
- [T.3] C. Montero. *Caractérisation du comportement viscoélastique asymptotique du bois*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2010.
- [T.4] J. Colmars. *Hygromécanique du matériau bois appliquée à la conservation du patrimoine culturel*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, April 2011.
- [T.5] M. El Mouridi. *Caractérisation mécanique de la loupe de thuya (Tetraclinis Articulata (Vahl) Masters) en vue de sa valorisation*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2011.
- [T.6] P. R. G. Hein. *Genetic and environmental control of microfibril angle on eucalyptus wood : its effects on wood traits and implication for selection*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, June 2011.
- [T.7] A. Se Golpayegani. *Caractérisation du bois de Mûrier blanc (Morus alba L.) en référence à son utilisation dans les luths Iraniens*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, November 2011.
- [T.8] P. Darabi. *Propriétés de composites de polyéthylène haute densité et résidus de canne à sucre : effet de la délignification des fibres et d'un traitement de surface sur la résistance à la photo- et la bio-dégradation*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2012.
- [T.9] J. Froidevaux. *Viellissement du bois et des couches de peintres et analyse de risques d'anciens panneaux peints*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, October 2012.
-

Autres publications

- [W.1] J. Dlouha, **T. Alméras**, **B. Clair**, **J. Gril**, and P. Horacek. Biomechanical performances of trees in the phase of active reorientation. *Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, LVI :1–6, 2008.
- [W.2] P. Dionisi Vici, L. Uzielli, and J. Colmars. Instrumentations pour le contrôle continu des panneaux peints en bois. *Technè*, 29 :21–27, 2009.
- [W.3] **F. Dubois**, **D. Dureisseix**, and B. Marcon. Simulation of wooden structures and painting supports of cultural heritage with a code coupling for thermo-hygro-mechanical evolutions, 2010.
- [W.4] **J. Gril**. Les dessous de La Joconde, Etude mécanique des panneaux peints en bois du patrimoine, 2010.
- [W.5] **T. Laurent**, J.-L. Kergueme, **O. Arnould**, and **D. Dureisseix**. Eco-conception d'un bras de robot grande vitesse en bois 2. Enseignement par projet en master " Création Industrielle en Mécanique ". *Technologie*, 169 :24–35, 2010.
- [W.6] **T. Laurent**, J.-L. Kergueme, **O. Arnould**, and **D. Dureisseix**. Eco-conception d'un bras de robot grande vitesse en bois 1. Méthode de conception et justification du choix du matériau. *Technologie*, 168 :28–36, 2010.
- [W.7] C. Montero, **J. Gril**, and **B. Clair**. Pour l'arbre, la cellule ose la cellulose, 2010.

- [W.8] **I. Brémaud**. Les bois de table d'harmonie - quelles différences entre l'épicéa et le red cedar ?, 2011.
- [W.9] **I. Brémaud**. Red cedar et épicéa : L'éclairage de la recherche, 2011.
- [W.10] **I. Brémaud**, M. Garcia, and B. Salençon. La canne de Provence, forme végétale et matériau sonore, 2011.
- [W.11] S. Chang, J. Hu, **B. Clair**, and F. Quignard. Pore structure characterization of poplar tension wood by nitrogen adsorption-desorption method. *Scientia Silvae Sinicae*, 47 :134–140, 2011.
- [W.12] **B. Clair** and **J. Gril**. Bois pour l'arbre et bois pour l'homme, 2011.
- [W.13] M. El Mouridi, **T. Laurent**, A. Farimi, B. Kabouchi, **T. Alméras**, G. Calchéra, A. El Abid, M. Ziani, **J. Gril**, and A. Hakam. Caractérisation physique du bois de la loupe de Thuya. *Physical Chemical News*, 59 :57–64, 2011.
- [W.14] **J. Gril**. A l'UMII, un labo prédit l'avenir des œuvres, 2011.
- [W.15] **D. Jullien**. Le bois et son retrait anisotrope, 2013.
- [W.16] **D. Jullien** and **I. Brémaud**. Bois, matériau moderne, 2013.

5 Modélisation Mathématique en Mécanique (M3)

Intervenants : *P. Alart (PR), O. Anza Hafsa (MCF), M. Bellieud (MCF HDR), L. Daridon (PR), G. Geymonat (DR CNRS émérite, départ LMS Paris en 2012), C. Licht (DR CNRS), sS. Pagano (DR CNRS), T. Weller (CR CNRS), J.P. Mandallena (MCF HDR, Université de Nîmes), N. Auffray (post-doc 2010-2012), A. Lozovskiy (post-doc 2011-2013),*

Doctorants : *J-S. Dupuy (EM Alès, 2005-2008), R. Laniel (MRT, 2005-2008), A. L. Bessoud (MRT, 2006-2009), P. Juntharee (Gouvernement Thaïlandais, 2006-2009), D. Iceta (MRT, 2007-2010), P. Mateille (DGA, 2007-2010), P. Sawangtong (Gouvernement Thaïlandais, 2007-2010), N. Sontichai (Gouvernement Thaïlandais, 2007-2010), TMP Hoang (SNCF, 2008-2011), A. Nait-ali (MRT, 2009-2012), P. Taforel (CIFRE, 2009-2012), V. Visseq (MRT, 2010-2013), N. Blal (MRT, 2010-2013), Q.T. Vo (BDI CNRS, 2010-soutenance prévue en 2013), X. Haller (IRSN, 2012-2015), T. Madani (IRSN, 2012-2015).*

L'équipe M3 est actuellement constituée de 7 permanents, dont 4 enseignants-chercheurs, 3 chercheurs CNRS.

En terme de ressources humaines, la composition de l'équipe a été modifiée au cours des 5 dernières années : Giuseppe Geymonat, DR émérite, a quitté le LMGC en 2012, Michel Bellieud, précédemment Maître de Conférences à l'Université de Perpignan, a muté à l'Université Montpellier 2 et l'équipe en septembre 2011. L'arrivée de M. Bellieud, Habilité à Diriger des Recherches (HDR) depuis quelques semaines, permet de renforcer les aspects de « modélisation mathématique ». De plus, 13 doctorants ont débuté ou soutenu leur thèse pendant ce quinquennal.

L'activité de l'équipe est dédiée principalement au développement de méthodes mathématiques pertinentes pour l'analyse de thématiques telles que les changements d'échelles et la réduction de dimension, la caractérisation du comportement des matériaux (problèmes inverses, milieux complexes,...), etc. La modélisation numérique est également un point fort de l'équipe (modélisation discrète de milieux continus, dialogue entre modèles discrets et continus et entre formulations dynamique et statique, etc.). L'activité des membres de l'équipe s'articule autour de 5 grands thèmes. Dans les deux premiers l'accent est mis sur le renforcement de points traditionnellement fort de notre activité, mais exigeant encore des développements pour permettre une description plus fine des phénomènes mis en jeu. Le troisième thème regroupe plus spécifiquement les actions en lien avec la modélisation numérique. Le dernier thème rassemble des activités plus originales par rapport aux axes usuellement développés dans M3.

Des collaborations, que l'on peut qualifier de pérennes, avec d'autres équipes du laboratoire ou le laboratoire I3M (UM2) ont enrichi les activités de l'équipe tout au long de ce quadriennal. L'équipe a souhaité renforcer ces collaborations internationales en accueillant pour des séjours allant d'une semaine à un mois des professeurs étranger : A. Pandolfi (Politecnico di Milano), S. Orankitjaroen (Mahidol University, Bangkok), A. Ould-Khaoua (Université Los Andès, Bogota, Colombie), B. Holtzman (LDEO-Columbia University), H. Zorgati (Université de Tunis El Manar), O. Oussouadi (EST de Meknes, Maroc), Kirill Cherednichenko (Cardiff University).

Les ressources financières de l'équipe se sont diversifiées au cours de ce quadriennal et donnent une « aisance » financière aux membres de M3. Les collaborations ont conduit l'équipe à participer à différents montages de projet ANR dont 2 ont été obtenus. Plusieurs contrats de recherche (IRSN, SNCF, GEOTER) ont permis un accroissement des ressources contractuelles de l'équipe. De plus,

plusieurs membres de M3 font parties du laboratoire commun MIST entre l'IRSN, l'UM2 et le CNRS. Ces différents projets ont permis de financer 4 doctorants (BDI, CIFRE, etc.).

Durant ce contrat, différents projets fédérateurs ont été menés. Ainsi, plusieurs personnes sont intervenues dans les trois écoles thématiques organisées respectivement à Clermont-Ferrand, Paris et Montpellier et intitulées : *CNRS Summer school, Identification procedures using full-field measurements, Applications in mechanics of materials and structures*. En 2011, l'équipe a organisé le 10ème Colloque National en Calcul des Structures. Ce colloque, dont c'était la dixième édition, rassemble théoriciens, numériciens, développeurs de logiciels et ingénieurs pour faire le point sur les grands axes et les thèmes nouveaux dans le domaine du calcul de structures. Le colloque CSMA 2011 s'est déroulé du 9 au 13 mai 2011. La participation a atteint un sommet, en totalisant environ 400 participants dont 150 doctorants. Le budget d'une telle manifestation est d'environ 334 k€.

1 Changements d'échelles et réduction de dimension

1.1 Jonctions

Intervenants : *C. Licht, T. Weller, G. Michaille (I3M Montpellier), O. Iosifescu (I3M Montpellier), A. Léger (LMA, Marseille), A. Ould Khaoua (Université Los Andès, Bogota, Colombie), S. Orankitjaroen (Université Mahidol, Bangkok, Thaïlande),*

Doctorants : *A. L. Bessoud.*

On s'est intéressé, aux modèles asymptotiques obtenus, pour des jonctions souples (joints collés souples) et des jonctions raides (certains types de soudure). La jonction souple est remplacée par une liaison mécanique entre les adhérents dont la densité d'énergie surfacique est une fonction du déplacement relatif des adhérents le long de l'interface en laquelle se réduit la jonction. Au contraire, la jonction raide est remplacée par une surface matérielle, parfaitement collée aux deux adhérents, dont la densité d'énergie de déformation est une fonction du gradient surfacique du déplacement. Plusieurs points nouveaux ont été développés ces cinq dernières années :

* Jonctions souples

- Joints imparfaitement collés, liaisons composites, interfaces multi-échelées : la modélisation classique de G. Michaille et C. Licht a été étendue au cas où la liaison entre adhérent et adhésif est décrite par une fonction convexe très générale.
- Joints chargés : un cas réaliste est un problème à inconnue scalaire (la déflexion d'une membrane faite de trois parties et soumise à un chargement même dans l'étroite partie centrale). Le modèle asymptotique consiste encore en le remplacement du joint par une liaison mécanique dont la fonctionnelle énergie totale incorpore le chargement et est en général une fonction locale non seulement du déplacement relatif des adhérents le long de l'interface limite mais des déplacements de chaque adhérent le long de cette interface.
- Dynamique de corps élastiques liés par un joint mince et souple : la considération, dans le cadre des petites déformations, de ce cas, capital tant du point de vue fondamental que pratique, a fait l'objet d'une invitation [C1.6] à participer aux travaux du GDR 2501 *Etude de la propagation ultrasonore en vue du contrôle non-destructif*. Il est montré que la liaison limite obtenue dans le cas statique perdure en dynamique ! Ces conclusions ont été étendues au cas de joints dissipatifs d'abord non linéaires de type Kelvin Voigt puis faits de matériaux standard généralisés.

* Jonctions raides

- Soudage fragile : Considérant le cordon de soudure comme une bande de faible épaisseur pseudo-plastique de « rigidité » d'ordre de l'inverse de l'épaisseur, le modèle asymptotique exhibe une interface matérielle d'énergie fonction convexe à croissance linéaire de la mesure gradient tangentiel du déplacement de l'interface [A.23, I.4, I.6, T.4].
- Modélisations d'une structure constituée de l'assemblage de deux solides à l'aide d'une couche mince très rigide : le matériau dans la couche rigide présente des transitions de phase solide/solide, la couche mince a un comportement plastique [T.3].

1.2 Structures minces

Intervenants : *O. Anza Hafsa, G. Geymonat, C. Licht, T. Weller, J.P. Mandallena (Université de Nîmes).*

Plaques et poutres multiphysiques

L'étude rigoureuse par analyse asymptotique de plaques [A.15, A.26, A.32, A.37] et de poutres linéairement piézoélectriques [A.18, A.26] a conduit à des résultats surprenants de découplage structural et à des modèles non locaux. Le cas dynamique a été envisagé dans [A.27]. Ensuite, un couplage plus complexe a été étudié et a conduit à la modélisation de plaques piézo-magnétoélastiques, exposée dans [A.32]. Curieusement peu connu, le cas des plaques piézoélectriques avec gradient du champ électrique a conduit à la note [A.55]. L'idée d'introduire le gradient de la polarisation électrique est due à Mindlin et a permis de résoudre un certain nombre d'anomalies mises en évidence dans les années 1960 lors d'expérimentation sur des structures piézoélectriques. Nos résultats ont aussi fait l'objet de la communication [à rajouter, conf Delhi Décembre 2012].

Modèle de membrane non linéaire sous la condition $\det \nabla u > 0$

Nous avons réussi à dériver un modèle de membrane non linéaire à partir d'une réduction de dimension par Γ -convergence en tenant compte des conditions naturelles de l'élasticité non linéaire, i.e., la non-interpénétration de la matière et la nécessité d'une énergie infinie pour ramener un volume en un point. C'est un problème qui a été attaqué par H. Le Dret et son étudiant H. Ben Belgacem au milieu des années 90. Un travail conséquent a été produit dans la thèse de Ben Belgacem. Cependant des zones d'ombres persistaient. Ce problème posait des difficultés réelles qui ont été résolues par l'introduction de concepts nouveaux en calcul des variations : les densités d'énergies p -ample qui permettent de considérer des contraintes sur les gradients de déformations s'éliminant au cours de la quasiconvexification. Cela nous a aussi conduit à adapter des résultats de géométrie différentielle (h-principe) de Gromov et Eliashberg (méthode d'élimination des singularités) pour des problèmes d'approximations par des immersions.

1.3 Homogénéisation

Intervenants : *P. Alart, O. Anza Hafsa, M. Bellieud, L. Daridon, C. Licht, S. Pagano, T. Weller, G. Michaille (I3M Montpellier), S. Orankitjaroen (Université Mahidol, Bangkok, Thaïlande), N. Ngoc Trung (Kangwon National University, Corée du Sud), J.P. Mandallena (Université de Nîmes), M.L. Leghmizi (Université de Medea), Y. Monerie (IRSN, Cadarache),*

Doctorants : *R. Laniel (LARMAUR), A. Nait-ali, N. Blal, P. Juntharee, N. Sontichai (Université Mahidol, Bangkok, Thaïlande).*

Géomatériau renforcé par des fils

Le TexSol est un matériau du Génie Civil constitué de sable et de fils textiles. Ce dernier constituant, même en très faible fraction volumique, confère au milieu une bien meilleure tenue mécanique. Dans la thèse de R. Laniel, il a été proposé un modèle continu biphasé, sable + fils, du premier gradient thermodynamiquement cohérent et une méthodologie d'identification du modèle continu à partir de données fournies par les essais numériques discrets [A.12]. Suite à ces travaux, dans la thèse de A. Nait-ali avons proposé un modèle mathématique d'un matériau aléatoirement renforcé à partir d'une étude asymptotique variationnelle. Le modèle limite obtenu (homogène et déterministe) a été validé par une étude numérique [A.40].

Relaxation avec contraintes

Il s'agit d'étudier le problème de la relaxation d'énergies élastiques non convexes sous des conditions sur les gradients de déformations proches de celles de l'élasticité non linéaire. Dans [A.4] nous avons réussi à prendre en compte la condition $\det \nabla u \neq 0$ en utilisant le concept de p -amplitude.

Même si la préservation de l'orientation n'est pas considérée il s'agit d'une avancée dans la prise en compte des conditions de l'élasticité non linéaire.

Dans [A.29], la relaxation est étudiée en considérant des contraintes convexes bornées. Un concept nouveau en calcul des variations y est introduit : les densités d'énergies radialement uniformément semi-continue supérieurement (ru-scs).

Homogénéisation par Γ -convergence avec contraintes

Dans [A.34], le concept de p -amplitude nous a permis d'étudier le problème de l'homogénéisation périodique en prenant en compte la nécessité d'une énergie infinie pour ramener un volume en un point. Dans les travaux [A.33, A.46] nous considérons des problèmes d'homogénéisation périodique avec des contraintes convexes sur les gradients de déformations. Le concept de densité d'énergie ru-scs joue un rôle fondamentale dans l'obtention de la densité homogénéisée.

Milieux complexes

L'étude des composites à fort contraste est une discipline relativement récente qui suscite un fort intérêt dans la communauté scientifique du fait des nombreuses applications. Ces composites peuvent par exemple être constitués d'une matrice comprenant, en quantité infinitésimale, un matériau aux propriétés extrêmes, finement et régulièrement réparti dans la matrice. Dans ce cas, ils se caractérisent par l'apparition d'une concentration d'énergie autour des traces de composants extrêmes. Pour des composites élastiques linéaires comprenant des inclusions granulaires, la capacité introduite permet en particulier de rendre compte des concentrations d'énergies associées aux rotations des inclusions [A.47]. L'extension de ce résultat a été faite au cas de structures fibrées viscoplastiques, permettant la mise en évidence de concentrations d'énergies associées aux rotations des fibres autour de leur axes et de concentration d'énergie de torsion à l'intérieur des fibres [A.57]. Il est possible de s'affranchir de la répartition périodique des composants dans le cas de composites avec une interpolation trigonométrique à fort contraste de type « capacitaires » [A.58].

Approche numérique en Homogénéisation

La méthode consiste à résoudre le problème (linéaire ou non) posé sur la cellule de base donnant le comportement homogénéisé par une méthode de décomposition coordination par Lagrangien Augmenté via un algorithme d'Uzawa. A chaque itération, un problème de type Laplacien avec conditions aux limites de périodicité doit être résolu. Plutôt que d'utiliser une méthode d'éléments finis, l'idée est de procéder à une interpolation trigonométrique des champs. La résolution du Laplacien est alors très simple et très rapide en utilisant un algorithme de transformation de Fourier rapide. Nos résultats [A.41] montrent un excellent agrément avec les calculs éléments finis et sont une alternative intéressante à la méthode de Moulinec-Suquet, référence en la matière. . .

Distributions périodiques d'interfaces de faible épaisseur

Le rôle des interfaces peut être très important et il convient d'essayer de ne pas négliger leur épaisseur. Deux cas ont été traités où les interfaces ont un comportement mécanique identique à celui des autres constituants du milieu à structure périodique, mais avec des coefficients beaucoup plus petits. Dans le premier cas, le comportement est dissipatif (viscoélasticité de Kelvin-Voigt) et le domaine occupé par l'ensemble des interfaces n'est pas connexe, dans le second le comportement est linéairement élastique et le domaine occupé par toutes les interfaces est connexe.

- Composites viscoélastiques : Il s'agit d'une distribution périodique d'inclusions dans une matrice avec des interfaces très minces, les coefficients d'élasticité et de viscosité des interfaces sont de l'ordre de l'épaisseur des interfaces. En juxtaposant des arguments d'homogénéisation et de modélisation mathématique des jonctions, on a établi que le comportement effectif n'est plus de type Kelvin-Voigt mais présente un terme additionnel de mémoire longue. Une étude numérique a permis de quantifier l'influence des divers paramètres.
- Maçonneries : Des maçonneries minces et plates peuvent être modélisées par une distribution périodique de briques parallélépipédiques élastiques liées par du mortier linéairement élastique

plus souple et occupant un domaine connexe bien plus étroit. Dans un premier temps, on a pratiqué une étude bidimensionnelle [C2.14] et établi rigoureusement les résultats heuristiques de K. Sab. Par rapport au cas précédent, l'absence de connexité du domaine occupé par le matériau raide complique le traitement mathématique, c'est aussi le cas de milieux stratifiés [T.8].

Identification des propriétés mécaniques de matériaux composites par analyse vibratoire

Dans la thèse de N. Blal, un ensemble de critères micromécaniques pour la calibration des lois cohésives est proposé. Le principe de la modélisation consiste à remplacer une discrétisation de type éléments finis par un milieu volumique continu et durcissant contenant une distribution d'inclusions cohésives. Le comportement global équivalent associé est obtenu par des techniques d'homogénéisation linéaires et non linéaires. Le modèle permet d'obtenir des relations directes entre les paramètres cohésifs et les propriétés effectives du matériau pour les comportements élastique, fragile et ductile. Une analyse inverse permet ainsi d'établir des critères pratiques pour la calibration des paramètres cohésifs et de rendre les modèles cohésifs insensibles à la taille de maille.

2 Caractérisation du comportement des matériaux et des structures

Intervenants : *L. Daridon, T. Weller, O. Arnould (MAB), A. Chrysochoos (ThM2), R. Abdelmoula (LPMTM Paris XIII), A. Fanget (DGA), B. Holtzman (LDEO-Columbia University), S. Corn (École des Mines d'Alés, EMA), P. Ienny (EMA), J.-J. Mariigo (LMS, École Polytechnique), C. Duriez (IRSN), Y. Monerie (IRSN),*

Doctorants : *J.-S. Dupuy (EMA), P. Mateille (DGA), Q.T. Vo.)*

Identification des propriétés mécaniques de matériaux composites par analyse vibratoire

Ce travail porte sur la caractérisation rapide de l'endommagement de matériaux composites à partir d'analyses mécaniques vibratoires. Plusieurs techniques expérimentales non-intrusives, dont certaines reposent sur l'analyse des fréquences de résonance de la structure ont été développées. Les propriétés viscoélastiques de matériaux composites particuliers sphériques à matrice polymère amorphe ont été analysées [A.52]. Un prolongement plus théorique lié à l'homogénéisation périodique d'un milieu triphasique viscoélastique a été mené (cf. section homogénéisation). Après une étude rigoureuse permettant d'établir la loi de « contact » viscoélastique entre la particule et la matrice, nous avons fait une étude numérique de l'influence des paramètres sur le comportement homogénéisé. Nous finalisons actuellement une publication sur ces travaux.

Identification des sources de l'endommagement dans un matériau énergétique

Ce travail autour de la thèse de P. Mateille traite de la caractérisation de l'endommagement apparaissant dans les matériaux énergétiques lors des chocs à basse vitesse. Il s'agit de contribuer à l'amélioration de la compréhension des phénomènes d'endommagement de ce type de matériaux à travers le développement d'un dispositif expérimental de type tour de chute afin d'observer les niveaux d'endommagement et leurs localisations en fonction des niveaux d'énergie mis en jeu. Ce dispositif a permis de discriminer la cause de la multifissuration observée dans les grains à l'aide de la mise en place d'une instrumentation optimale de métrologie (systèmes d'interférométrie, fibres optiques, caméras rapides, etc.), puis d'une analyse de la morphologie des échantillons impactés par des moyens de type microtomographe ou rayon X. En parallèle, nous avons fait des simulations numériques des essais afin de déterminer le comportement mécanique adhoc capable de reproduire les comportements observés.

Un modèle thermodynamique de comportement basé sur l'évolution de la taille de grains dans les roches lors de la déformation à haute température.

La taille des grains dans les roches polycristallines est l'une des caractéristiques principales qui détermine le comportement rhéologique de la roche lors de la déformation à haute température dans les couches profondes de l'écorce terrestre. Dans les zones où la déformation ductile est localisée, on observe des marqueurs comme la faible taille de grains dans la roche. Aux pressions et aux températures considérées dans le manteau, on s'attend à ce que l'olivine se déforme sous une certaine combinaison du fluage de diffusion (à travers le réseau ou les joints de grains), du fluage de dislocation et du glissement des joints de grains (GBS). Dans un cadre thermo-dynamique, il a été proposé un modèle de comportement rendant compte de la compétition de 2 ou 3 mécanismes conduisant à un état d'équilibre lié à une taille de grain stable.

Obtention de lois de fatigue

Les résultats obtenus concernant l'évolution de la fissuration lors d'une sollicitation cyclique en Mode III [A.20] ont été étendus au cas d'une sollicitation en Mode I dans [A.19] puis exposés en détail dans [A.28]. L'idée repose sur le fait que le modèle cohésif de Dugdale-Barenblatt contient une longueur caractéristique qui est petite devant les dimensions de la structure. Il apparaît donc un petit paramètre qui permet, à l'aide de développements asymptotiques raccordés, de justifier les lois phénoménologiques de type Paris.

Imagerie mécanique pour les composites à matrice métallique

Dans ce travail, on s'intéresse au cas d'un matériau composite comportant deux phases (matrice/inclusions). Une méthode simple est proposée pour identifier les propriétés élastiques d'une phase tandis que les propriétés de l'autre phase sont supposées connues. La méthode est basée à la fois sur un schéma d'homogénéisation inverse et sur la donnée de mesures de champs mécaniques. L'originalité de l'approche repose sur l'échelle étudiée : la taille caractéristique des inclusions est d'environ quelques dizaines de microns.

3 Dynamique non-régulière

Intervenants : *P. Alart, F. Dubois (REMICS), L. Daridon, S. Pagano, M. Bonnet,*
 Doctorants : *D. Iceta, TMP Hoang, P. Taforel, V. Visseq, N. Auffray, A. Lozovski.*

Décomposition de domaine de milieux granulaires denses.

La dynamique non régulière permet de simuler le comportement de milieux granulaires avec un nombre important de corps en interaction quelque soit le régime (gazeux, fluide, solide) et sans régularisation. Traiter de très grands systèmes permet progressivement de lever l'hypothèse d'un volume élémentaire représentatif, hypothèse extrêmement difficile à justifier théoriquement. Nous avons mis en œuvre plusieurs stratégies originales de décomposition de domaines avec implémentation sur machines à architecture parallèle.

- Décomposition à partitionnement primal pour architecture à mémoire partagée [A.43, C2.2, C2.7] et application au ballast ferroviaire [T.9]
- Décomposition à partitionnement dual pour architecture à mémoire distribuée [A.22, B.1, A.54], avec enrichissement aux interfaces [C2.13, T.5], de type Schwarz et application aux maçonneries.

Indétermination des réseaux d'efforts dans les granulats fortement confinés.

Il s'agit d'une étude exploratoire récente visant à maîtriser et accélérer la convergence du schéma d'intégration de l'approche NSCD (NonSmooth Contact Dynamics) notamment lors de la simulation de granulats denses fortement confinés. Deux thèmes sont traités : l'indétermination du réseau d'efforts de contact, en prenant en compte le noyau de l'opérateur de Delassus, et l'interpénétration résiduelle due à la formulation en vitesse-impulsion du contact unilatéral. Au delà de l'optimisation

numérique visée, l'approche proposée peut motiver l'exploration d'une stratégie de représentation multi-modèle séparant les comportements global-statique-continu et local-dynamique-discret.

Multi-représentation et réduction de modèle.

Dans le cadre du projet ANR Saladyn en partenariat avec EDF R&D, le LAMSID, l'INRIA Rhône-Alpes et Schneider Electric, il a été mis en lace une méthode permettant de décomposer un solide déformable en des parties rigide et déformable dans le contexte des éléments discrets. La décomposition est réalisée de telle manière que la partie déformable du champ de vitesse ne contribue pas au mouvement du centre de masse et au mouvement de rotation. La méthode numérique associée permet de calculer les mouvements rigide et déformable et a été étendue à la simulation de la dynamique multi-corps prenant en compte le contact [R.1].

Maçonnerie sous sollicitation sismique.

Dans la thèse de P. Taforel [T.11], il a été développé des méthodes d'évaluation du risque sismique appliquées à des structures anciennes (maçonnerie composée de blocs de pierre) soumises à des sollicitations sismiques. Le but est de mettre en place des méthodes plus rapides de calcul en mêlant milieux discrets et milieux continus (modèles homogénéisés). Sur ce thème, une formulation corotationnelle par corps a été développée afin de séparer le traitement de la partie « rigide » et de la partie « déformable » en petite perturbation par rapport à la précédente [C1.21, C1.25].

Détermination de sources de chaleur à partir de mesures de cartes de température.

Ces sources sont déduites de cartes de température de surface obtenues par thermographie infrarouge. Elles traduisent le caractère dissipatif des processus de déformation et indiquent l'existence de mécanismes de couplage thermomécanique. Ceci a été abordé dans le cadre de l'ANR QIRD-THS et rejoint également les préoccupations du groupe de travail « Thermographie » au sein du GdR 2519 [A.56].

4 Problèmes divers

Intervenant : C. Licht, T. Weller, Tran Thu Ha (Institute of Mechanics of Hanoi, Viet Nam), G. Geymonat,

Doctorants : *P. Sawangtong (Université Mahidol, Bangkok, Thaïlande).*

Problèmes de thermique (auto-échauffement)

La thèse en cotutelle (soutenue en décembre 2010) d'un étudiant thaï P. Sawangton étudie, par des méthodes d'analyse classique (fonctions de Green et équations intégrales) ou fonctionnelle (semi-groupes), les conditions de blow-up pour une équation semi-linéaire de la chaleur dans le cas de sources diffuses ou locales dépendant (non linéairement) de la température en un point donné ou de sa moyenne dans une région donnée. Quelques résultats ont été présentés à une conférence internationale [C1.11].

Modélisation d'écoulements réels

En vue de la régulation des crues du fleuve rouge en amont de Hanoï et des problèmes de pollution dans les estuaires, nous avons d'abord proposé une résolution des équations linéarisées de Saint-Venant par semi-groupes d'opérateurs [A.27, C1.6] pour ensuite espérer résoudre les équations non linéaires en imitant une procédure utilisée pour les équations de Navier Stokes.

Controlabilité des équations aux dérivées partielles

Un théorème abstrait montre que un système elliptique de type Douglis-Nirenberg d'ordre mixte ayant un spectre essentiel n'est pas contrôlable, au sens qu'il existe des données initiales pour le

problème d'évolution associée telles que le système ne peut pas être ramené au repos en temps fini. Dans [A.2] G. Geymonat a, dans un cas particulier, caractérisé le sous-espace des données initiales qui sont contrôlables.

Caractérisation des champs symétriques

La caractérisation des champs de matrices symétriques \mathbf{E} réguliers dans un domaine simplement connexe qui sont des champs de déformations, i.e. qui peuvent être écrits comme $\mathbf{E} = \nabla_s(\mathbf{v})$ pour un \mathbf{v} convenable est un résultat fondamental de A. J.C. B. de Saint Venant (condition nécessaire, 1864) et E. Beltrami (condition suffisante, 1886). L'extension de ces conditions aux domaines non-simplement connexes est due à V. Volterra (1906) qui s'inspire des résultats établis par Poincaré pour les champs vectoriels. Dans [A.21] ces résultats sont généralisés au cas de domaines lipschitziens et de champs matriciels peu réguliers.

Dualité en élasticité linéaire

Dans [?] à l'aide d'une décomposition des champs de matrice, déjà utilisée dans [A.21], on donne une nouvelle application de la dualité de Fenchel-Legendre-Moreau à l'élasticité linéaire pour obtenir une formulation dite *intrinsèque* de l'élasticité linéaire.

Bibliographie

Articles dans des revues

- [A.1] **P. Alart** and **D. Dureisseix**. A scalable multiscale LATIN method adapted to nonsmooth discrete media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197 :319–331, 2008. **.
- [A.2] F. Ammar-Khodja, **G. Geymonat**, and A. Münch. On the exact controllability of a system of mixed order with essential spectrum. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series I - Mathematics*, 346 :629–634, 2008.
- [A.3] **O. Anza Hafsa** and J.P. Mandallena. Relaxation theorems in nonlinear elasticity. *Annales de l'institut Henri Poincaré (C) Analyse non linéaire*, 25 :135–148, 2008.
- [A.4] **O. Anza Hafsa** and J.P. Mandallena. The nonlinear membrane energy : variational derivation under the constraint $\det \nabla u > 0$. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 132 :272–291, 2008.
- [A.5] P. Aubert, **C. Licht**, and **S. Pagano**. Some numerical simulations of large deformations of heterogeneous hyperelastic media. *Computational Mechanics*, 41 :739–746, 2008.
- [A.6] S. Avril, M. Bonnet, A. S. Bretelle, M. Grediac, F. Hild, P. Ienny, F. Latourte, D. Lemosse, **S. Pagano**, E. Pagnacco, and F. Pierron. Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements. *Experimental Mechanics*, 48 :381–402, 2008.
- [A.7] A.-L. Bessoud, F. Krasucki, and M. Serpilli. Plate-like and shell-like inclusions with high rigidity. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Serie 1, Mathématique*, 346 :697–702, 2008.
- [A.8] L. Campagne-Lambert, **L. Daridon**, O. Oussouaddi, S. Ahzi, and X. Sun. Simulation of the Taylor impact test and analysis of damage evolution using a nucleation and growth based approach. *Modeling, Measurement and Control*, 77 :19–35, 2008.
- [A.9] **A. Chrysochoos**, B. Berthel, F. Latourte, A. Galtier, **S. Pagano**, and **B. Wattrisse**. Local energy analysis of high-cycle fatigue using digital image correlation and infrared thermography. *Journal of Strain Analysis*, 43 :411–421, 2008. **.
- [A.10] **A. Chrysochoos**, B. Berthel, F. Latourte, **S. Pagano**, **B. Wattrisse**, and B. Weber. Local energy approach to steel fatigue. *Strain*, 44 :327–334, 2008. **.
- [A.11] C. Husson, J.P.M. Correia, **L. Daridon**, and S. Ahzi. Finite elements simulations of thin copper sheets blanking : study of blanking parameters on sheared edge quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 199 :74–83, 2008.
- [A.12] R. Laniel, **P. Alart**, and **S. Pagano**. Discrete element investigations of wire-reinforced geomaterial in a three-dimensional modeling. *Computational Mechanics*, 42 :67–76, 2008.
- [A.13] F. Latourte, **A. Chrysochoos**, **S. Pagano**, and **B. Wattrisse**. Elastoplastic behavior identification for heterogeneous loadings and materials. *Experimental Mechanics*, 48 :435–449, 2008. **.
- [A.14] F. Latourte, A. Samida, **A. Chrysochoos**, **S. Pagano**, and **B. Wattrisse**. An inverse method applied to the determination of deformation energy distributions in the presence of pre-hardening stresses. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 43 :705–717, 2008. **.

- [A.15] **C. Licht** and **T. Weller**. Mathematical modeling of thin multiphysical structures. *Advanced Materials Research*, 47 :483–485, 2008.
- [A.16] N. Ouadoudi, O. Oussouaddi, **L. Daridon**, S. Ahzi, and **A. Chrysochoos**. Influence of dissipated energy on adiabatic shear band spacing : influence de l'énergie dissipée sur la formation des bandes de cisaillement adiabatique multiples. *Physical and Chemical News*, 39 :75–81, 2008. **.
- [A.17] **S. Pagano** and **P. Alart**. Self-contact and fictitious domain using a difference convex approach. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 75 :29–42, 2008.
- [A.18] **T. Weller** and **C. Licht**. Asymptotic modeling of linearly piezoelectric slender rods. *Comptes Rendus Mécanique*, 336 :572–577, 2008.
- [A.19] R. Abdelmoula, J.-J. Marigo, and **T. Weller**. Construction d'une loi de fatigue à partir d'un modèle de forces cohésives : cas d'une fissure en mode III. *Comptes Rendus Mécanique*, 337 :53–59, 2009.
- [A.20] R. Abdelmoula, J.-J. Marigo, and **T. Weller**. Construction des lois de fatigue à partir de modèles de forces cohésives : cas de fissures en mode I. *Comptes Rendus Mécanique*, 337 :166–172, 2009.
- [A.21] **G. Geymonat** and F. Krasucki. Hodge decomposition for symmetric matrix fields and the elasticity complex in lipschitz domains. *Communications on Pure and Applied Analysis*, 8 :295–309, 2009.
- [A.22] D. Iceta, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Mixed versus impulse-oriented Domain Decomposition Method for granular dynamics. *European Journal of Computational Mechanics*, 18 :429–443, 2009. **.
- [A.23] O. Iosifescu, P. Juntharee, **C. Licht**, and G. Michaille. A mathematical model for a pseudo-plastic welding joint. *Analysis and Applications*, 7 :243–267, 2009.
- [A.24] O. Iosifescu, **C. Licht**, and G. Michaille. Nonlinear Boundary Conditions in Kirchhoff-Love Plate Theory. *Journal of Elasticity*, 96 :57–79, 2009.
- [A.25] R. Laniel, **P. Alart**, and **S. Pagano**. From discrete to continuous numerical identification of a geomaterial with an internal length. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199 :113–122, 2009.
- [A.26] **C. Licht**, H. Tran Tu, and V. Quoc Phong. On some linearized problems of shallow water flows. *Differential and integral equations*, 22 :275–284, 2009.
- [A.27] **C. Licht** and **T. Weller**. Mathematical modelings of smart materials and structures. *East-West Journal of Mathematics*, 13 :23–33, 2009.
- [A.28] R. Abdelmoula, J.-J. Marigo, and **T. Weller**. Construction and justification of Paris-like fatigue laws from Dugdale-type cohesive models. *Annals of Solids and Structural Mechanics*, 1 :139–158, 2010.
- [A.29] **O. Anza Hafsa**. On the integral representation of relaxed functionals with convex bounded constraints. *ESAIM : Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 16 :37–57, 2010.
- [A.30] F. Lebon and F. Zaittouni. Asymptotic modelling of interfaces taking contact conditions into account : asymptotic expansions and numerical implementation. *International Journal of Engineering Science*, 48 :111–127, 2010.
- [A.31] **T. Weller** and **C. Licht**. Mathematical modeling of piezomagnetolectric thin plates. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 29 :928–937, 2010.
- [A.32] **T. Weller** and **C. Licht**. Asymptotic modeling of thin piezoelectric plates. *Annals of Solid and Structural Mechanics*, 2 :87–98, 2010.
- [A.33] **O. Anza Hafsa**, M. L. Leghmizi, and J.-P. Mandallena. On a homogenization technique for singular integrals. *Asymptotic Analysis*, 74 :123–134, 2011.
- [A.34] **O. Anza Hafsa** and J.-P. Mandallena. Homogenization of nonconvex integrals with convex growth. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 96 :230–252, 2011.

- [A.35] N. Blal, **L. Daridon**, Y. Monerie, and **S. Pagano**. Criteria on the artificial compliance inherent to the intrinsic cohesive zone. *Comptes Rendus Mécanique*, 339 :789–795, 2011.
- [A.36] **L. Daridon**, **B. Wattrisse**, **A. Chrysochoos**, and M. Potier-Ferry. Solving fracture problems using an asymptotic numerical method. *Computers and Structures*, 89 :476–484, 2011. **.
- [A.37] **G. Geymonat**, S. Hendili, F. Krasucki, and M. Vidrascu. The matched asymptotic expansion for the computation of the effective behavior of an elastic structure with a thin layer of holes. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 9 :529–542, 2011.
- [A.38] **G. Geymonat**, **C. Licht**, and **T. Weller**. Plates made of piezoelectric materials : When are they really piezoelectric? *Applied Mathematical Modelling*, 35 :165–173, 2011.
- [A.39] **C. Licht**. Some New Mathematical Modelings of Junctions. *East-West Journal of Mathematics*, 13 :23–33, 2011.
- [A.40] G. Michaille, A. Nait-Ali, and **S. Pagano**. Macroscopic behavior of a randomly fibered medium. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 96 :230–252, 2011.
- [A.41] N.-T. Nguyen, **C. Licht**, and J.-H. Kweon. An Efficient Homogenization Method using the Trigonometric Interpolation and the Fast Fourier Transform. *Viet-Nam Journal of Mechanics*, 33 :1–9, 2011.
- [A.42] O. Oussouaddi, **L. Daridon**, S. Ahzi, and **A. Chrysochoos**. Influence of Dissipated Energy on Shear Band Spacing in HY100 Steel. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 133 :Voir DOI, 2011. **.
- [A.43] H. Thi Minh Phuong, **P. Alart**, **D. Dureisseix**, and G. Saussine. A Domain Decomposition method for granular dynamics using discrete elements and application to railway ballast. *Annals of Solid and Structural Mechanics*, 2 :87–98, 2011. **.
- [A.44] **P. Alart**, D. Iceta, and **D. Dureisseix**. A nonlinear Domain Decomposition formulation with application to granular dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 205-208 :59–67, 2012. **.
- [A.45] **O. Anza Hafsa** and J.-P. Mandallena. Homogenization of unbounded singular integrals in $W_{1,\infty}$. *Ricerche di matematica*, 61 :185–217, 2012.
- [A.46] **O. Anza Hafsa** and J.-P. Mandallena. Relaxation and 3d-2d Passage Theorems in Hyperelasticity. *Journal of Convex Analysis*, 19 :759–794, 2012.
- [A.47] **M. Bellieud**. A notion of capacity related to elasticity. Applications to homogenization. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 203 :137–187, 2012.
- [A.48] A.-L. Bessoud, P. Juntharee, **C. Licht**, and G. Michaille. A mixing effect induced by sources concentrated in a soft junction and the gradient concentration phenomenon. *Asymptotic Analysis*, pages 1–17, 2012.
- [A.49] N. Blal, **L. Daridon**, Y. Monerie, and **S. Pagano**. Micromechanical-based criteria for the calibration of cohesive zone parameters. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 246 :206–214, 2012.
- [A.50] N. Blal, **L. Daridon**, Y. Monerie, and **S. Pagano**. Artificial compliance inherent to the intrinsic cohesive zone models : criteria and application to planar meshes. *International Journal of Fracture*, 178 :71–83, 2012.
- [A.51] L. Chamoin, E. Florentin, S. Pavot, and V. Visseq. Robust goal-oriented error estimation based on the constitutive relation error for stochastic problems. *Computers and Structures*, 89 :476–484, 2012.
- [A.52] S. Corn, J. S. Dupuy, P. Ienny, and **L. Daridon**. Vibration analysis techniques for detecting filler-matrix decohesion in composites. *Revue des composites et des matériaux avancés*, 22 :77–90, 2012.
- [A.53] T. M. P. Hoang, G. Saussine, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Domain decomposition with discrete element simulations using shared-memory parallel computing for railways applications. *European Journal of Computational Mechanics*, 21 :242–253, 2012. **.

- [A.54] V. Visseq, A. Martin, D. Iceta, **E. Azéma**, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Dense granular dynamics analysis by a domain decomposition approach. *Computational Mechanics*, 49 :709–723, 2012. ***.
- [A.55] **T. Weller** and **C. Licht**. Asymptotic Modeling of piezoelectric plates with electric field gradient. *Comptes Rendus Mécanique*, 340 :405–410, 2012.
- [A.56] N. Auffray, M. Bonnet, and **S. Pagano**. Identification of transient heat sources using the reciprocity gap. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 21 :721–738, 2013.
- [A.57] **M. Bellieud**. Problèmes capacitaires en viscoplasticité avec effets de torsion. *Comptes Rendus Mathématiques*, 351 :241–245, 2013.
- [A.58] **M. Bellieud**, **C. Licht**, and S. Orankitjaroen. Nonlinear Capacitary Problems for a General Distribution of Fibers. *Applied Mathematics Research eXpress*, page voir DOI, 2013.
- [A.59] **C. Licht**, A. Léger, S. Orankitjaroen, and A. Ould Khaoua. Dynamics of elastic bodies connected by a thin soft viscoelastic layer. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 99 :685–703, 2013.
- [A.60] **C. Licht** and S. Orankitjaroen. Dynamics of elastic bodies connected by a thin soft inelastic layer. *Comptes Rendus Mécanique*, 337 :166–172, 2013.

Participations à un ouvrage

- [B.1] D. Iceta, **P. Alart**, and **D. Dureisseix**. A multilevel domain decomposition solver suited to nonsmooth mechanical problems. pages 113–120. Springer Verlag, 2009.
- [B.2] A. Léger, **C. Licht**, and F. Lebon. Dynamics of elastic bodies connected by a thin adhesive layer. pages 99–110. Springer, 2009.
- [B.3] M. Bonnet, C. Cornuault, and **S. Pagano**. *10e colloque national en calcul des structures (CSMA 2011)*. –, 2011.
- [B.4] **S. Pagano** and M. Bonnet. Erreur en relation de comportement. pages 293–318. Hermes, 2011.
- [B.5] **S. Pagano** and M. Bonnet. Constitutive Equation Gap. page 26p. John Wiley & Sons, 2012.

Communications avec actes dans des colloques

- [C1.1] B. Berthel, F. Latourte, **S. Pagano**, **B. Wattrisse**, and **A. Chrysochoos**. Fields of dissipated and stored energy accompanying the hcf of steels. In *Photomechanics 2008*, page CDrom 26p, Loughborough, Royaume-Uni, 2008.
- [C1.2] **T. Weller** and **C. Licht**. Mathematical modeling of linearly piezoelectric slender rods. In *XXII ICTAM*, page 2p., Adelaïde, Australie, 2008.
- [C1.3] D. Iceta, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Comparaison de méthodes de décomposition de domaine multiéchelles en dynamique granulaire. In *9e Colloque National en Calcul des Structures - Giens 2009*, volume 1, pages 161–166, Giens, France, 2009.
- [C1.4] R. Laniel, **P. Alart**, and **S. Pagano**. Description of Wire-Reinforced Geomaterials by Numerical Discrete Experiments. In *Conference on Traffic and Granular Flow*, pages 609–614, Orsay, France, 2009. SPRINGER-VERLAG NEW YORK, MS INGRID CUNNINGHAM, 175 FIFTH AVE, NEW YORK, NY 10010 USA.
- [C1.5] F. Latourte, **A. Chrysochoos**, B. Berthel, A. Galtier, **S. Pagano**, and **B. Wattrisse**. Local energy analysis of HCF fatigue using DIC & IRT. In *SEM 2009*, pages Cd-Rom, Albuquerque, États-Unis, 2009.
- [C1.6] **C. Licht**, T. Thu Ha, and Q. Phong Vu. Two linearized problems of shallow water flows. In *Thermal Hydrodynamics of Multiphase Flows and Applications*, pages 117–120, Viet Nam, 2009.

- [C1.7] P. Mateille, S. Coussy, **L. Daridon**, **O. Arnould**, A. Fanget, and E. Lapebie. Mise en œuvre expérimentale d'impacts basse vitesse sur matériau énergétique. In *19e Congrès Français de Mécanique*, page CDRom 6p, Marseille, France, 2009.
- [C1.8] P. Mateille, **L. Daridon**, **O. Arnould**, A. Fanget, and G. Contesse. Mesoscale Analysis of dynamic loading and their physical consequences on a propellant : numerical and mechanical modelisations issues. In *Groupe de travail MécaDymat - Journées 2009*, page 7 p., Bourges, France, 2009.
- [C1.9] S. Orankitjaroen, N. Sontichai, **C. Licht**, and A. Kananthai. Mathematical Modeling of Fiber Reinforced Structures by Homogenization. In *13th Annual Meeting in Mathematics 2007*, pages 103–115, Thaïlande, 2009.
- [C1.10] S. Orankitjaroen, N. Sontichai, **C. Licht**, and A. Kananthai. Remark on the Homogenization of a Micro-fibered Linearly Elastic Material. In *International Conference on Mathematics and Applications, ICMA-MU 2009*, pages 153–165, Thaïlande, 2010.
- [C1.11] P. Sawangtong, **C. Licht**, B. Novaprateep, and S. Orankitjaroen. Existence and Uniqueness of Blow-up Solutions for a Parabolic Problem with a Localized Nonlinear Term via Semi-group Theory. In *International Conference on Mathematics and Applications, ICMA-MU 2009*, pages 139–152, Thaïlande, 2010.
- [C1.12] N. Auffray, M. Bonnet, and **S. Pagano**. Identification de sources de chaleur dans le contexte de la thermographie infrarouge. In *10e colloque national en calcul des structures*, page 8 p.; Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.13] M. Bagneris, **F. Dubois**, A. Martin, **R. Mozul**, and P. Taforel. De l'intérêt de la courbure dans les interfaces : application aux structures en pierre. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.14] N. Blal, **L. Daridon**, Y. Monerie, and **S. Pagano**. On mesh size to cohesive zone parameters relationships. In *ACOMEN 2011*, pages Cd-Rom, Liège, Belgique, 2011.
- [C1.15] N. Blal, **L. Daridon**, Y. Monerie, and **S. Pagano**. Modèle micromécanique d'endommagement basé sur des approches cohésives : bornes et relations micro-macro. In *20ème Congrès Français de Mécanique*, page Clé USB, France, 2011.
- [C1.16] N. Blal, **L. Daridon**, Y. Monerie, and **S. Pagano**. Modèle micromécanique d'endommagement basé sur des approches cohésives. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.17] **L. Daridon**, **D. Dureisseix**, S. Garcia, and **S. Pagano**. Changement d'échelles et zoom structural. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.18] **G. Geymonat**, S. Hendili, F. Krasucki, and M. Vidrascu. Modélisation par développements asymptotiques raccordés d'une structure présentant une fine couche d'inclusions rigides disposées périodiquement. In *CFM 2011 - 20 ème congrès français de mécanique*, Besançon, France, 2011.
- [C1.19] **G. Geymonat**, S. Hendili, F. Krasucki, and M. Vidrascu. Implémentation de la méthode des développements asymptotiques raccordés dans le cas d'une fine couche d'hétérogénéités. In *10e colloque national en calcul des structures*, page 8 p., Giens, France, 2011.
- [C1.20] A. Nait-Ali, G. Michaille, and **S. Pagano**. Problèmes non-locaux en mécanique du solide : modélisation variationnelle de matériaux de type Texsol par homogénéisation stochastique. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.21] P. Taforel, **F. Dubois**, A. Martin, **R. Mozul**, and **S. Pagano**. Feedback on modeling issues of assemblies made of polyhedral objects through non smooth discrete element methods. In *Euromech Colloquium 516 : Nonsmooth contact and Impact laws in Mechanics*, page 2p., France, 2011.
- [C1.22] P. Taforel, **F. Dubois**, A. Martin, and **S. Pagano**. Développement de formulations dynamiques adaptées à la modélisation par éléments discrets de structures maçonnées sous chargements sismiques. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.

- [C1.23] A. Venneri, P. Taforel, and **F. Dubois**. Modelli di pannelli murari rinforzati con fibre naturali : analisi numerica e sperimentale. In *AIAS*, page 10p., Palerme, Italie, 2011.
- [C1.24] T. Vo Quoc, C. Duriez, Y. Monerie, and **S. Pagano**. Essai de traction sur Zircaloy avec corrélation d'images numériques. In *20 ème Congrès Français de Mécanique*, page Clé USB, Besançon, France, 2011.
- [C1.25] P. Taforel, **F. Dubois**, and **S. Pagano**. Evaluation of numerical uncertainties on the modeling of dry masonry structures submitted to out-of-plane loading, using the NSCD method in comparison with experimental test. In *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, page 19 p., Vienne, Autriche, 2012.
- [C1.26] **T. Weller** and **C. Licht**. Mathematical modeling of thin piezoelectric plates with electric field gradient. In *Third Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures*, pages 139–142, Inde, 2012.
- [C1.27] A. Nait-Ali, G. Michaille, and **S. Pagano**. Stratégie de modélisation de matériaux aléatoirement renforcés. In *CSMA2013*, pages 8 p., Clé USB, Giens, France, 2013.
- [C1.28] T. Vo Quoc, C. Duriez, Y. Monerie, and **S. Pagano**. Phase property identification using inverse homogenization approaches and field measurements. In *PhotoMechanics 2013*, page Clé USB, Montpellier, France, 2013.

Communications sans actes dans des colloques

- [C2.1] D. Iceta, **P. Alart**, and **D. Dureisseix**. A multiscale domain decomposition for the simulation of a non smooth structure, involving a numerical homogenization. In *18th International Conference on Domain Decomposition Methods - DD18*, Jerusalem, Israël, 2008.
- [C2.2] **P. Alart**, D. Iceta, T. M. Phuong Hoang, D. Dureisseix, and G. Saussine. Décomposition de domaine en dynamique granulaire par éléments discrets et application au ballast ferroviaire. In *19e Congrès Français de Mécanique - CFM09*, Marseille, France, 2009.
- [C2.3] D. Iceta, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Two domain decomposition methods for granular dynamics. In *5th Contact Mechanics International Symposium (CMIS09)*, Chania, Grèce, 2009.
- [C2.4] **C. Licht**, P. Juntharee, and G. Michaille. A mathematical modeling of not perfectly adhesive bonded joints. In *Colloquium Lagrangianum 2009*, Maratea, Italie, 2009.
- [C2.5] P. Mateille, **L. Daridon**, **O. Arnould**, A. Fanget, and G. Contesse. Mesoscale Analysis of dynamic loading and their physical consequences on a propellant : numerical and mechanical modelisations issues. In *9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading - DYMAT 2009*, Bruxelles, Belgique, 2009.
- [C2.6] P. Mateille, **L. Daridon**, **O. Arnould**, A. Fanget, and G. Contesse. Mesoscale Analysis of dynamic loading and their physical consequences on a propellant : numerical and mechanical modelisations issues. In *XI Khariton's Topical Scientific Readings International Conference : Extreme States of Substance. Det, Sarov, Russie, Fédération De*, 2009.
- [C2.7] **P. Alart**, **D. Dureisseix**, T. M. Phuong Hoang, and G. Saussine. Domain Decomposition methods for granular dynamics using discrete elements and application to railway ballast. In *7th Meeting on Unilateral Problems in Structural Analysis*, Palmanova, Italie, 2010.
- [C2.8] N. Auffray, M. Bonnet, and **S. Pagano**. Parabolic reciprocity gap for heat source identification. In *European Conference on Computational Mechanics (ECCM 2010)*, Paris, France, 2010.
- [C2.9] D. Iceta, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Domain decomposition for granular dynamics : scalability issue. In *5th European Conference on Computational Mechanics - ECCM2010*, Paris, France, 2010.
- [C2.10] **C. Licht**, A. Léger, and A. Ould Khaoua. Dynamics of elastic bodies bonded by a thin visco-elastic layer. In *The 6th conference of the GDR Research on Ultrasound Propagation for NDT*, Royaume-Uni, 2010.

- [C2.11] M. Vidrascu, **G. Geymonat**, S. Hendili, and F. Krasucki. Some asymptotic models for a thin layer of heterogeneities in an elastic structure. In *ECCM 2010 - IV European Conference on Computational Mechanics*, Paris, France, 2010.
- [C2.12] N. Blal, **L. Daridon**, Y. Monerie, and **S. Pagano**. Overall behavior of elastic materials with embedded cohesive zone models :rigorous bounds and mesh size-to-cohesive properties relationships. In *ESIS-TC Workshop on Numerical Methods for Materials Failure*, France, 2011.
- [C2.13] D. Iceta, V. Visseq, **E. Azéma**, and **P. Alart**. Influence of Domain Decomposition Method on the solution of a simple granular test via the N.S.C.D. In *ICCCM 2011 - II International Conference on Computational Contact Mechanics*, Allemagne, 2011.
- [C2.14] N. Sontichai, S. Orankitjaroen, and **C. Licht**. A simplified 2-dimensional model for some elastic masonries. In *International Conference on Mathematics and Applications, ICMA-MU 2011*, Thaïlande, 2011.
- [C2.15] N. Blal, **L. Daridon**, Y. Monerie, and **S. Pagano**. Some Numerical and Mechanical Issues When Using Intrinsic Cohesive Approaches. In *European Solid Mechanics Conference (ESMC)*, Autriche, 2012.
- [C2.16] **C. Licht**. Dynamics of elastic bodies bonded by a thin layer. In *Franco-Thai Symposium 2012*, Thaïlande, 2012.
- [C2.17] **C. Licht**, A. Léger, and **T. Weller**. Waves in an elastic body bonded by a tin layer. In *The 7th conference of the GDR Wave propagation in complex media for quantitative and non destructive evaluation*, France, 2012.
- [C2.18] A. Nait-Ali, G. Michaille, and **S. Pagano**. Two Dimensional Deterministic Model of a Thin Body with Micro High Stiffness Fibers Randomly Distributed. In *ESMC 2012*, Autriche, 2012.
- [C2.19] V. Visseq, A. Martin, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Issues in domain decomposition method dedicated to non-smooth contact dynamics. In *Euromech 514 : New trends in Contact Mechanics*, France, 2012.
- [C2.20] N. Blal, **L. Daridon**, Y. Monerie, and **S. Pagano**. Overall elastoplastic behaviour of a cohesive medium. In *International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures*, Prague, Tchèque, République, 2013.

Conférences invitées

- [I.1] **G. Geymonat** and A. Munch. Controllability for thin linearly elastic shells. In *Selected Topics of Contemporary Solid Mechanics*, volume IPP Report n° 2, pages 302–303, France, 2008.
- [I.2] **P. Alart**, D. Iceta, T. M. Phuong Hoang, D. Dureisseix, and G. Saussine. Two domain decomposition strategies for granular dynamics using discrete elements. In *Free Boundary Problems, Applications to the fluid mechanics, friction and impact phenomena*, Saint Etienne, France, 2009.
- [I.3] **C. Licht**. Mathematical Modelings of Junctions. In *IX Annual Congress New Researchers Meeting Thai Research Fund Distinguished and Senior Researcher*, Thaïlande, 2009.
- [I.4] **C. Licht**. Some Mathematical Models of Junctions. In *XVII Congreso Colombiano de Matemáticas*, Colombie, 2009.
- [I.5] **P. Alart**. Is it reasonable to split sand grains before gluing them together? In *Fifty Years of Finite Freedom Mechanics*, France, 2010.
- [I.6] **C. Licht**. Dynamics of Assemblies of linearly elastic bodies. In *Jornadas de Mecânica Matemática*, Colombie, 2010.
- [I.7] **C. Licht**. Mathematical Modelings of Assemblies. In *16th Annual Meeting in Mathematics*, Thaïlande, 2010.
- [I.8] **P. Alart**. Substructuring strategies for granular systems. In *ICCCM 2011, II International Conference on Computational Contact Mechanics*, Allemagne, 2011.

- [I.9] **C. Licht**. Dynamics of Assemblies of linearly elastic bodies. In *International Conference on Mathematics and Applications, ICMA-MU 2011*, Thaïlande, 2011.
- [I.10] **C. Licht**. Some New Mathematical Modelings of Junctions. In *International Conference in Mathematics and Applications*, volume 13, pages 23–33, Bangkok, Thaïlande, 2011.
- [I.11] N. Blal, **A. Chrysochoos**, **L. Daridon**, Y. Monerie, **S. Pagano**, **B. Wattrisse**, and S. Wen. Imagerie thermomécanique et changements d'échelles pour l'identification de modèles de zones cohésives. In *11ème colloque national en calcul des structures, CSMA2013*, Giens, France, 2013.
- [I.12] **C. Licht**. Waves in Elastic Bodies Connected by a Thin and Soft Elastic Layer. In *International Conference on Mathematics and Applications*, Thaïlande, 2013.

Rapports de recherche

- [R.1] A. Lozovski, **L. Daridon**, **F. Dubois**, and **S. Pagano**. The method of a floating frame of reference for non-smooth contact dynamics. R.

HDR

- [H.1] **M. Bellieud**. *Quelques problèmes d'homogénéisation à fort contraste en élasticité*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, May 2013.

Thèses

- [T.1] J.S. Dupuy. *Identification des propriétés mécaniques de matériaux composites par analyse vibratoire*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2008.
- [T.2] M. Serpilli. *Contributions à la modélisation des structures minces et d'assemblages multicouches*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, June 2008.
- [T.3] A.-L. Bessoud. *Modélisations mathématiques d'un multi-matériau*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, June 2009.
- [T.4] P. Juntharee. *Quelques modèles mathématiques de jonctions*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, November 2009.
- [T.5] D. Iceta. *Simulation numérique de la dynamique des systèmes discrets par décomposition de domaine et application aux milieux granulaires*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, July 2010.
- [T.6] P. Mateille. *Analyse multi-échelle des phénomènes d'endommagement d'un matériau composite de type propegol, soumis à un impact de faible intensité*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2010.
- [T.7] P. Sawangtong. *Blow-up pour des problèmes paraboliques semi-linéaires avec un terme source localisé*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2010.
- [T.8] N. Sontichai. *Modélisation mathématique de quelques problèmes de mécanique par homogénéisation*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2010.
- [T.9] T. M. P. Hoang. *Optimisation des temps de calculs dans le domaine de la simulation par éléments discrets pour des applications ferroviaires*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2011.
- [T.10] A. Nait-Ali. *Matériaux aléatoirement renforcés de type Texsol : modélisation variationnelle par homogénéisation stochastique*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, November 2012.

- [T.11] P. Taforel. *Apport de la Méthode des Éléments Discrets à la Modélisation des Maçonneries en Contexte Sismique : Vers une Nouvelle Approche de la Vulnérabilité Sismique*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2012.
- [T.12] V. Visseq. *Calcul haute performance en dynamique des contacts via deux familles de décomposition de domaine*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, July 2013.

Autres publications

- [W.1] **C. Licht**, A. Léger, and F. Lebon. Dynamics of elastic bodies connected by a thin adhesive layer, 2008.
- [W.2] **O. Anza Hafsa** and J.-P. Mandallena. Relaxation and 3d-2d passage with determinant type constraints : an outline.
- [W.3] **O. Anza Hafsa** and J.-P. Mandallena. Relaxation et passage 3D-2D avec contraintes de type déterminant.

6 Physique et Mécanique des Matériaux Granulaires (PMMG)

Intervenants : E. Azéma (MCF), C. Bohatier (PR, retraite 2010), J.-Y. Delenne (MCF HDR), S. El Youssoufi (PR), F. Jamin (MCF), F. Radjai (DR CNRS), V. Topin (post-doc), B. Mielniczuk (post-doc), P. Tafforel (post-doc), Doctorants : C. Voivret (MRT, 2005-2008), V. Topin (INRA-Région, 2005-2008), B. Saint-Cyr (CEA, 2008-2011), J.-P. Gras (MRT, 2008-2011), R. Affes (IRSN-CNRS, 2009-2012), J.-C. Quezada (SNCF, 2009-2012), M. Boton (Université Los Andes, 2010-2013), E. Chichti (INRA, 2010-2013), M. Mansouri (Gouvernement Algérien-CNOUS, 2010-2013), P. Mutabaruka (MRT, 2009-2013), M. Champagne (BDI CNRS-MBD, 2010-2013), V.-H Nhu (LaMCoS-MRT, 2010-2013), N. Berger (ArcelorMittal, 2010-soutenance prévue en 2014), D.-H. Nguyen (CEA, 2010-2014), J. Ngoma (IRSTEA, 2011-2014), L. Amarsid (IRSN, 2012-2015), J. Rivière (Messier-Bugatty-Dowty, 2012-2015), F.Z. El Korchi (Labex Numev - Gouvernement Marocain, 2012-2015).

1 Introduction

L'équipe PMMG a été constituée en 2010 dans la continuité de l'axe thématique *Solides Granulaires* avec l'objectif de renforcer la recherche sur les matériaux granulaires au sein du LMGC en s'appuyant sur la modélisation mécanique et l'analyse physique à la fois d'un point de vue fondamental et en application aux géomatériaux, à la technologie des poudres, aux processus géologiques et au domaine agro-alimentaire. Ce rapport recouvre les travaux réalisés depuis janvier 2010 dans le cadre de l'équipe PMMG mais aussi la période 2008-2010 pour des membres qui participaient alors à l'axe Solides Granulaires .

L'équipe PMMG est impliquée aujourd'hui dans un large spectre de travaux de recherche allant des développements numériques novateurs, tels que les interactions gaz-liquide-grains et les processus de fragmentation de particules, jusqu'à l'analyse micromécanique des milieux granulaires constitués des particules de diverses formes en passant par la modélisation de leur rhéologie. Le statut très fédérateur des milieux granulaires, abondamment présents dans la nature et dans de nombreuses industries de transformation, nous a également permis d'élargir le champ d'action de l'équipe en créant des réseaux de recherche, avec des projets collaboratifs institutionnalisés au niveau international ainsi qu'en consolidant nos partenariats industriels et nos collaborations contractuelles avec plusieurs organismes de recherche.

2 Présentation de l'équipe

En 2010, l'équipe PMMG comptait 6 membres permanents : E. Azéma (enseignant-chercheur), C. Bohatier (enseignant-chercheur), J.-Y. Delenne (enseignant-chercheur), S. El Youssoufi (enseignant-chercheur), F. Jamin (enseignant-chercheur) et F. Radjai (chercheur CNRS). C. Bohatier est parti à la retraite en septembre 2010. L'équipe n'a pas pu obtenir un remplacement de ce poste, et J.-Y. Delenne a quitté l'équipe pour un poste de directeur de recherche à l'INRA de Montpellier en septembre 2012 après une année de séjour à l'Université de Cambridge. Mais entre temps M. Renouf (chercheur CNRS) a rejoint l'équipe par mobilité interne en septembre 2011. En pratique, l'équipe a ainsi fonctionné avec 5 permanents.

3 Rayonnement et attractivité académiques

L'équipe a élaboré et déposé plusieurs projets (6 au total) dont trois ont été acceptés :

1. Projet MIT-France Seed Fund intitulé "Micro-mechanical modeling of natural granular media" pour la période 01.13-07.14 et d'un volume de 18000 \$ pour les frais de voyage et de séjour de 3 chercheurs et 2 étudiants. Ce projet est porté par F. Radjai (PMMG) et K. Kamrin (MIT, Boston).
2. Projet Ecos-Nord France-Colombie C12PU01 intitulé "Etudes numériques et expérimentales de processus granulaires environnementaux" pour la période 01.2012-12.2014 pour les frais de voyage et de séjour de 2 chercheurs et de 2 étudiants. Ce projet est porté par F. Radjai et E. Azéma au LMGC et N. Estrada (Université Los Andes, Colombie). Une thèse (M. Botton) est co-encadrée dans ce cadre.
3. Projet OpenScience d'Agropolis Fondation intitulé "RoSoM - Influence of root-soil mechanical interaction on the variability of root architecture" pour la période 09.2013-10.2014 d'un volume de 133k€ dont 50 k€ pour le financement d'une 1/2 bourse de thèse. Ce projet est porté par F. Radjai (PMMG) et T. Fourcaud (UMR AMAP, CIRAD) et implique plusieurs partenaires dont UMR IATE-INRA (J.-Y. Delenne), PMMH-ESPCI (E. Kolb) et plusieurs chercheurs de James Hutton Institut (Dundee, UK).

L'équipe a également développé les collaborations actives suivantes :

1. Université de Cambridge–Engineering Department (K. Soga) depuis 2010 avec un séjour de deux mois de F. Radjai et J.-Y. Delenne en 2010, le co-encadrement d'une thèse (P. Mutabaruka) et un Churchill College Fellowship discerné à J.-Y. Delenne pour un séjour d'un an (2011-2012) à Cambridge.
2. Université Nationale de Colombie (J. D. Munoz) avec le séjour de 6 mois d'un doctorant Colombien (W. Oquendo) au LMGC et participation à l'encadrement de sa thèse.
3. University of British Columbia (M. Taiebat) avec un séjour de deux mois de F. Radjai (2012) à Vancouver et un projet soumis pour un financement de l'état canadien.
4. Agroscope–Suisse (T. Keller) avec un article collaboratif (100 pages) intitulé "An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction" par Keller et al. dans *Soil and Tillage Research* (2012).
5. Aarhus University–Denmark (P. Schjønning et M. Lamande) avec un article collaboratif (Keller et al.) et un cours avancé d'une semaine à Denmark où J.-Y. Delenne a présenté les méthodes numériques développées au LMGC.
6. Duke University - USA (T. Hueckel) sur un projet (Approche multi-échelles du couplage chimio-mécanique dans les géomatériaux granulaires) financé par le CNRS sous forme de CDD (B. Mielniczuk) et qui se poursuit par un financement de post-doc européen par l'IRSN.
7. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - LMS (L. Laloui) sur un projet (Evolution de la rhéologie des sols granulaires lors de processus d'imbibition ou de drainage d'eau) correspondant à une thèse (F.Z. El Korchi) co-financée par le Labex Numev et le gouvernement Marocain..
8. PPF CEGEO (Changement d'Echelle dans les Géomatériaux) regroupant plusieurs laboratoires (LMGC, IRSTEA, 3SR–Grenoble, LTDs–Ecole Centrale de Lyon) pendant la période 2007-2011 avec un volume annuel de 60 k€. Un article collaboratif a été publié dans ce cadre ("Particle shape dependence in 2D granular media" par CEGEO et al. dans *Eur. Phys. Lett.*).
9. GdR MeGe (Couplage Multi-Physiques et Multi-échelles en Mécanique Géo-environnementale) où F. Radjai est membre du conseil scientifique et responsable de l'axe Mécanique et Géologie.
10. Réseau de recherche européen ALERT Geomaterials représenté par F. Radjai pour le LMGC.

L'équipe a organisé ou participé à l'organisation ou au conseil scientifique de plusieurs journées et colloques scientifiques dont :

1. Cours avancé CISM (International Center for Mechanical Sciences) proposé et organisé par F. Radjai, 3-7.09.2012, Udines, Italie. Le contenu de ce cours intitulé "Multiscale mechanics of granular materials" fait l'objet d'un ouvrage.

2. Congrès international et pluridisciplinaire Powders and Grains, 13-17.07.2009, Golden, Etats-Unis.
3. 9th International Conference on Bifurcation and Degradation of Geomaterials (IWBD- G2011), 23-26.05.2011, Porquerolles.
4. Symposium Euro-méditerranéen "Advances in Geomaterials and Structures" (AGS2010), 10-12.05.2010, Djerba, Tunisie.
5. 13^{èmes} Journées de la Matière Condensée (JMC13), 27-31.08.2012, Montpellier.
6. Colloque "Modélisation numérique des mélanges grains-fluides" dans le cadre du laboratoire commun MIST, 25.10.2012, Montpellier.
7. Session "Ecoulements Polyphasiques et Granulaires" du CFM 2009, 24-28.08.2009, Marseille
8. Mini-Symposium "Couplage Discret-Continu", 11^e Colloque CSMA en calcul des structures 2012, 13-17.05.2013, Giens.

Depuis 3 ans, plusieurs chercheurs de premier rang mondial du domaine des matériaux granulaires ont été invités par l'équipe pour un séminaire ou un séjour : K. Soga (Université de Cambridge, GB), S. Luding (Université Twente, Pays-bas) , J. Goddard (Université de Californie de Sud, séjour d'un mois), E. Guyon (ESPCI, Paris) K. Kamrin (MIT, USA), A. Lizcano et N. Estrada (Université Los Andes, Colombie), C. Thornton (Université de Birmingham, GB), J.-N. Roux (Ifsttar, Paris, séjour de 3 mois), T. Hueckel (Duke University), L. Laloui (LMS, EPFL).

Depuis 5 ans, l'équipe a produit plus de 40 articles dans des revues à comité de lecture, 20 conférences invitées, 4 ouvrages et un brevet.

4 Interaction avec l'environnement social

L'équipe PMMG a créé en 2010 le Réseau de Recherche Milieux Divisés (MiDi : reseau-midi.org) comme un espace d'échange et de communication scientifique ouvert aux chercheurs des laboratoires et instituts de Montpellier et de la région Languedoc-Roussillon qui étudient la matière granulaire sous ses diverses formes. L'objectif du réseau MiDi est donc de contribuer à une dynamisation de la recherche pluridisciplinaire sur la matière divisée par échanges d'information (liste de diffusion, portail informatique www.reseau-midi.org), par l'organisation de séminaires par des intervenants invités de haut niveau international, ainsi que par des cours destinés aux doctorants et chercheurs. Ce réseau regroupe aujourd'hui des chercheurs de plusieurs organismes de recherche : Université Montpellier 2 (laboratoires LMGC, Charles Coulomb, Géosciences et Hydrosiences), Université Montpellier 1 (Sciences Pharmaceutiques et Biologiques), Cirad (Unité AMAP), INRA (Unité IATE), et SNCF. Ce réseau a été labélisé par le Labex Numev (www2.lirmm.fr/numev) en 2012.

Nous avons créé également avec J.-Y. Delenne un portail intitulé Computational Granular Physics (cgp-gateway.org) pour fédérer les recherches en modélisation numérique des milieux divisés par ses membres. Ce portail publie des vidéos, des cours et d'autres documents issus des études numériques publiées par les membres du réseau.

L'équipe PMMG a activement participé à la rédaction du projet Labex Numev (Solutions Numériques, Matérielles et Modélisation pour l'Environnement et le Vivant) et est membre de l'axe "modélisation". L'équipe est aussi un membre actif du Laboratoire Commun MIST (Laboratoire de Micromécanique et Intégrité des Structures) entre le LMGC et l'IRSN. La mission principale de ce laboratoire est de comprendre et prédire le comportement des matériaux soumis à un environnement nocif. F. Radjai est responsable de l'axe "couplages" notamment pour les interactions fluide-grains.

L'équipe PMMG a obtenu plusieurs contrats depuis 5 ans :

1. SNCF (G. Saussine) : une thèse Cifre (J.-C. Quezada) et un contrat d'accompagnement (5 k€/an) pendant 3 ans pour l'étude de la dynamique du ballast.
2. ArcelorMittal (J.-F. Douce) : une thèse Cifre (N. Berger) et un contrat d'accompagnement (15 k€/an) pendant 3 ans pour l'étude du processus d'agglomération des minerais de fer.
3. CEA-Cadarache (P. Sornay) : deux thèses (B. Saint-Cyr et D.-H. Nguyen) avec des contrats d'accompagnement (10 k€/an) depuis 5 ans pour l'étude de la compaction des poudres d'uranium.

4. IRSN (Y. Monerie) : deux thèses financées (R. Affes et L. Amarsid) et des contrats d'accompagnement (15 k€/an) depuis 5 ans pour l'étude de la fragmentation et de la relocalisation du combustible nucléaire.
5. IRSTEA (P. Philippe) : une thèse financée en co-encadrement (J. Ngoma) pour l'étude de la liquéfaction.
6. INRA (V. Lullien) : une thèse financée (E. Chichti) en co-encadrement avec le laboratoire C. Coulomb (M. George) pour l'étude de la rhéologie de l'albumen de blé.

L'équipe participe également à des enseignements au niveau de l'Ecole Doctorale I2S (cours Milieux Granulaires d'un volume de 20h/an, au Collège de Polytechnique à Paris (cours Ecoulements Granulaires organisé par O. Pouliquen) et à plusieurs écoles thématiques.

5 Contours thématiques de l'équipe

Malgré leur grande diversité (poudres, sols, minerais, ...), les matériaux granulaires présentent des propriétés génériques qui découlent de leur microstructure discrète et désordonnée. L'objectif des recherches actuelles est de mieux caractériser et modéliser ces traits génériques des milieux granulaires mais aussi les comportements spécifiques qui dépendent des caractéristiques des particules (forme, tailles ...) et de leurs interactions (contact, frottement, cohésion capillaire, ...).

Les études réalisées dans l'équipe s'appuient sur des concepts et outils d'analyse empruntés à la mécanique des milieux continus et à la physique statistique et sur les simulations numériques par éléments discrets couplés éventuellement avec des méthodes alliées pour le fluide interstitiel, le transport de la chaleur, ... En application aux divers matériaux et procédés dans un contexte industriel ou collaboratif (le ballast pour la SNCF, les poudres frittées pour le CEA, le béton pour l'IRSN, les minerais pour l'Arcelor-Mittal, les roches granulaires pour les géosciences, l'albumen de blé pour l'INRA), nous avons fait évoluer ces approches et mis en place dans certains cas des procédures de validation expérimentale. Grâce à ces développements, nous sommes en mesure de réaliser des simulations numériques *avancées* avec des particules de formes variées (anguleuses, non-convexes, allongées) et granulométries très étalées, ou des simulations discrètes des assemblages granulaires couplées à une phase fluide par la résolution des équations de Navier-Stokes (Lattice Boltzmann ou FEM). De même, nous avons une plateforme logicielle dédiée à la simulation des petites déformations et de la rupture des matériaux cimentés (particules dans une matrice solide) par Lattice Element Method (LEM) en 3D et une méthodologie a été élaborée pour la simulation des matériaux granulaires avec la possibilité de fragmentation des particules. Dans ce qui suit, nous allons présenter très brièvement les thématiques abordées au cours des 5 dernières années.

5.1 Micro-mécanique et homogénéisation des écoulements granulaires

La modélisation du comportement quasi-statique des matériaux granulaires avec des variables internes liées à la texture géométrique (fabrique) est un thème majeur de l'équipe. Les travaux réalisés concernent l'évolution de la texture en termes de la connectivité des particules et des anisotropies des réseaux des contacts et des forces, et leurs liens étroits avec la contrainte de cisaillement.

5.1.1 Approximation harmonique de la texture

Intervenants : E. Azéma, F. Radjai

Nos analyses à partir des simulations numériques discrètes ont permis de mettre en évidence la robustesse de l'approximation harmonique de la texture et d'identifier ainsi les origines de la résistance au cisaillement (angle de frottement interne et cohésion de Coulomb) d'une manière quantitative à partir des paramètres décrivant l'anisotropie des contacts, les chaînes de force et la mobilisation du frottement. Nous avons récemment élargi ces études aux écoulements granulaires rapides en collaboration avec J.-N. Roux et F. Chevoir (Ifsttar).

5.1.2 Evolution de la texture

Intervenants : F. Radjai, E. Azéma, J.-Y. Delenne

Nous avons également analysé le rôle des exclusions stériques et de l'équilibre par rapport aux états géométriques accessibles d'un milieu granulaire. Une collaboration avec S. Roux (LMT-Cachan) est en cours sur ces aspects.

5.2 Matériaux constitués de particules non-sphériques

L'influence de la forme des particules sur le comportement et la texture des milieux granulaires a fait l'objet de plusieurs études avec des particules irrégulières polyédriques et des particules aplaties (plaquettes) en 3D et des particules de plusieurs formes (circulaire, polygonale, allongée, non-convexe) en 2D.

5.2.1 Polyèdres, polygones

Intervenants : E. Azéma, F. Radjai

En 3D, une étude paramétrique très détaillée a été entreprise en fonction de l'angularité des particules contrôlée par le nombre de faces de particules polyédriques. Cette étude nous a permis de montrer l'importance de la mobilisation du frottement et de l'anisotropie des forces dans la résistance au cisaillement pour des angularités élevées. Nous avons aussi analysé l'effet du degré d'angularité des particules en 2D. Un résultat majeur de ces études est de faire correspondre quantitativement un angle de frottement de roulement (une résistance au roulement entre particules circulaires) à chaque degré d'angularité, et ceci aussi bien pour la résistance au cisaillement que pour la compacité du milieu.

5.2.2 Particules allongées et plaquettes

Intervenants : E. Azéma, F. Radjai

Doctorants : M. Botton

La rhéologie des assemblages de particules allongées 2D a fait l'objet d'une étude détaillée en fonction de l'allongement des particules. De même, dans le cadre de notre projet Ecos-Nord France-Colombie, nous avons étudié la résistance au cisaillement et la compacité des assemblages de plaquettes (3D) comme un modèle des particules d'argile. L'ordre local joue un rôle important dans le comportement de ces assemblages.

5.2.3 Particules non-convexes

Intervenants : J.-Y. Delenne, E. Azéma, F. Radjai

Doctorants : B. Saint-Cyr

Le cadre des études réalisées avec le CEA sur la compaction des poudres d' UO_2 (agrégats rigides composés de cristallites de forme d'ovoïde) nous a permis d'étudier en détail l'influence du degré de non-convexité des particules avec et sans cohésion et le rôle des contacts multiples entre les agrégats en 2D et 3D.

5.2.4 Article commun

Intervenants : F. Radjai, E. Azéma, J.-Y. Delenne

Doctorants : B. Saint-Cyr

Dans le cadre du PPF CEGEO, nous avons réalisé une étude numérique comparative du comportement de matériaux avec plusieurs formes de particules. Nous avons ainsi montré le caractère générique d'un paramètre de forme qui mesure l'écart à une forme circulaire et qui permet de quantifier l'effet de la forme sur la compacité et la résistance au cisaillement. Un résultat intéressant de ce travail est l'évolution non-monotone de la compacité avec ce paramètre générique.

5.3 Matériaux granulaires hautement polydisperses

Intervenants : J.-Y. Delenne, F. Radjai, S. El Youssoufi

Doctorants : C. Voivret

La polydispersité de taille est une caractéristique essentielle des matériaux granulaires naturels tels que les sols. Dans certaines applications industrielles, telle que la formulation des bétons, la granularité est optimisée pour répondre à certains critères de qualité liés au remplissage d'espace. Mais l'influence de la polydispersité sur le comportement mécanique n'a jamais fait l'objet d'études systématiques. Sur le plan numérique, l'étude des matériaux granulaires à grande polydispersité se heurte au problème de la représentativité statistique des particules en nombre (pour les plus grosses particules) et en volume (pour les plus petites particules). Nous avons donc développé une méthode de génération ainsi qu'un modèle de courbe granulométrique avec des critères explicites de représentativité statistique. Le comportement mécanique est ensuite étudié par simulations numériques discrètes du cisaillement monotone de nos assemblages avec les conditions aux limites périodiques. Les analyses ont notamment porté sur l'impact des paramètres granulométriques (étalement et courbure) sur la texture et le comportement. Nos résultats montrent que la distribution uniforme par fraction volumique conduit à la plus grande compacité. L'angle de frottement interne s'avère être indépendante de la polydispersité, mais l'adhésion entre particules conduit à une cohésion macroscopique qui augmente sensiblement avec l'étalement granulométrique en corrélation avec l'anisotropie des forces.

5.4 Matériaux granulaires immergés

5.4.1 Avalanches sous-marines

Intervenants : J.-Y. Delenne, F. Radjai

Doctorants : P. Mutabaruka

Le déclenchement et de la propagation des avalanches sous-marines a été étudié par la méthode Lattice Boltzmann (LBM) pour l'intégration des équations de Navier-Stokes en fonction de paramètres tels que la compacité initiale, le nombre de Stokes et l'angle d'inclinaison. Ces milieux diffèrent des suspensions browniennes par leur grande densité et interactions de contact entre particules. Les modèles numériques 2D et 3D (DEM-LBM) développés dans ce cadre ont servi de base à une collaboration avec l'Université de Cambridge (K. Soga). Nous avons mis en évidence l'effet du couplage entre la dilatance et les pressions négatives des pores sur le délai de déclenchement et reproduit ainsi les expériences. Nous avons également élaboré un modèle de comportement avec la compacité comme variable d'état pour expliquer l'effet des paramètres sur le déclenchement.

5.4.2 Phénomène de boullance

Intervenants : J.-Y. Delenne, S. El Youssoufi

Doctorants : M. Mansouri

Un modèle numérique 3D a été développé pour l'analyse micromécanique de la réponse des milieux granulaires saturés d'eau, soumis à des sollicitations dynamiques. Les applications visées concernent l'étude des phénomènes de boullance et de liquéfaction des sables. Le solide granulaire est modélisé par la Méthode des Éléments Discrets ; les écoulements du fluide saturant, ainsi que les forces hydrodynamiques engendrées sur les grains, sont modélisés par la Méthode Lattice Boltzmann. Des aspects spécifiques au couplage des deux méthodes pour la prise en compte de l'interaction des deux phases sont développés. Le modèle a été appliqué, dans un premier temps, au calcul de la perméabilité d'un milieu granulaire et de l'estimation du gradient hydraulique critique conduisant au phénomène de boullance. Les résultats montrent une concordance de la perméabilité calculée par le modèle avec celle obtenue par la formule de Karman-Kozeny. Les simulations numériques du phénomène de boullance ont permis de reproduire les observations expérimentales.

5.4.3 Effondrement des colonnes

Intervenants : F. Radjai, F. Dubois

Doctorants : V. Topin

Un autre modèle numérique a été développé en collaboration avec l'IRSN (F. Perales, Y. Monerie) par l'interfaçage de la méthode de Dynamique des Contacts (plateforme LMG90) pour les particules et une méthode de Domaine Fictif avec des multiplicateurs de Lagrange distribués pour les équations du fluide en 2D. L'enjeu principal pour l'IRSN est de mieux appréhender les phénomènes pouvant conduire à des situations accidentelles, tels que la relocalisation du combustible dans le cas de l'apparition d'un ballonnement de la gaine cylindrique qui le contient et l'éjection de matière pouvant survenir lors de la rupture de cette même gaine. Les simulations ont permis d'étudier l'effondrement d'une colonne granulaire dans divers régimes (dominés respectivement par l'inertie des particules, l'inertie du fluide ou la viscosité du fluide) en fonction de la hauteur de la colonne. L'analyse des phases d'effondrement et d'étalement a permis de mettre à l'échelle la distance d'arrêt en fonction de la hauteur de la colonne et d'interpréter l'effet du fluide.

5.4.4 Écoulements des mélanges fluide-grains

Intervenants : F. Radjai, J.-Y. Delenne

Doctorants : L. Amarsid

Une autre étude a été mise en place dans le cadre d'une collaboration avec Hydrosiences de Montpellier (C. Delenne et V. Guinot) pour la modélisation des écoulements à surface libre (stage et CDD de L. Amarsid). L'association de ce modèle d'écoulement avec les granulaires immergés permet de générer des ondes de surface. Une série de simulations a été effectuée pour analyser l'effet de l'effondrement d'une colonne granulaire sur l'amplitude de ces ondes. Ce travail est actuellement poursuivi en thèse avec l'IRSN et dans le cadre du laboratoire commun MIST (Y. Monerie et F. Perales) et orienté vers l'analyse de la rhéologie des mélanges, l'hydrofissuration, la suffusion (transport et filtrage des grains fins), la migration, . . . en vue d'application au problème de relocalisation des fragments de combustible nucléaire en interaction avec le fluide caloporteur.

5.4.5 Fluidisation

Intervenants : J.-Y. Delenne, F. Radjai

Doctorants : J. Ngoma

Le fluide interstitiel est au cœur des catastrophes naturelles et technologiques par fluidisation ou par érosion interne dans les ouvrages hydrauliques. Pour mieux comprendre les instabilités hydromécaniques initiées par les interactions fluide/particules dans les matériaux granulaires immergés, une étude numérique a été initiée en collaboration avec IRSTEA d'Aix-en-Provence (P. Pierre) par la méthode LBM couplée à la méthode Dynamique Moléculaire. Ces études sont centrées actuellement sur la formation des cheminées de fluidisation et comparées à des études expérimentales réalisées à l'IRSTEA.

5.5 Matériaux granulaires cimentés

5.5.1 Rhéologie et fissuration

Intervenants : F. Radjai, J.-Y. Delenne

Doctorants : R. Affes

La modélisation sur réseau (Lattice Element Method) des petites déformations et de la rupture des milieux granulaires en présence d'une matrice solide a été poursuivie en dimension 3 en collaboration avec l'IRSN (Y. Monerie) et appliquée plus particulièrement à l'étude paramétrique du comportement en traction d'un assemblage dense en fonction de la fraction volumique de la matrice, de l'adhésion particule-matrice et de la distribution des tailles des particules. Ces études ont globalement confirmé les résultats 2D en ce qui concerne les régimes de rupture en considérant l'endommagement des particules. Une série d'études a été réalisée pour analyser l'effet de la granulométrie sur la tortuosité des fissures. Enfin, la méthode Lattice Boltzmann a été utilisée pour évaluer la perméabilité des fissures.

5.5.2 Agro-polymères

Intervenants : J.-Y. Delenne, F. Radjai

Doctorants : E. Chichti

L'albumen de blé peut être modélisé décrit comme un assemblage de granules d'amidon de deux ou trois tailles différentes enchâssées dans une matrice protéique. La modélisation du comportement de l'albumen constitue un élément important pour la maîtrise des procédés de fractionnement. Elle a fait l'objet d'une collaboration avec l'INRA de Montpellier (V. Lullien-Pellerin) qui se poursuit aujourd'hui par la caractérisation des propriétés des granules, du gluten et de leur interface par des mesures AFM en co-encadrement avec le laboratoire Charles Coulomb (M. George). Ces mesures sont introduites dans un modèle LEM pour la simulation de la fragmentation de l'albumen sous l'effet des efforts de traction pour mieux comprendre le rôle des puro-indolines dans la friabilité des céréales.

5.6 Matériaux granulaires non-saturés

5.6.1 Ponts capillaires

Intervenants : S. El Youssoufi, J.-Y. Delenne

Doctorants : J.-P. Gras, B. Mielniczuk

Ce travail, consacré à l'étude des milieux granulaires humides, s'intéresse à l'influence du phénomène de capillarité sur la rétention d'eau et sur le comportement mécanique de ces milieux. La méthode multi-échelles utilisée est basée sur des expérimentations/modélisations à l'échelle des interactions entre les grains, et sur des simulations en éléments discrets du comportement macroscopique qui sont comparées aux résultats d'expérimentation. Les courbes de rétention d'eau simulées par cette méthode sont proches des courbes de rétention d'eau expérimentales réalisées sur des milieux modèles composés de billes de verre. Sur le plan mécanique, la fragilisation du matériau en fonction de la succion s'explique par une diminution de la densité des ponts liquides. La prise en compte d'une rugosité des grains a permis une meilleure description de la transition entre un état humide et un état sec. L'étude des teneurs en eau plus élevées se poursuit dans le cadre du post-doctorat de B. Mielniczuk (encadré par S. El Youssoufi), notamment par la prise en compte du phénomène de coalescence et l'étude expérimentale (mesures de flux et de forces combinées à l'imagerie rapide) de son influence sur le comportement et la rupture de milieux granulaires non saturés. Cette étude est réalisée en collaboration avec T. Hueckel (Duke University).

5.6.2 Condensation capillaire

Intervenants : J.-Y. Delenne, F. Radjai

Les milieux granulaires acquièrent une cohésion capillaire importante en présence des ponts ou des amas d'un liquide mouillant. Nous avons développé un modèle LBM polyphasique pour la prise en compte des phases liquide et gazeuse dans un milieu granulaire à partir d'un diagramme d'isothermes. Ce modèle permet de contrôler la condensation homogène des gouttes sur les particules à partir de la phase vapeur et d'étudier ainsi les états d'équilibre du milieu pour une quantité de liquide croissante jusqu'à la saturation complète. Nous avons étudié en collaboration avec V. Richefeu (3SR) ce processus de saturation, la statistique des amas de liquide, les transitions de percolation et l'évolution de la cohésion.

5.6.3 Comportement des sols non saturés

Intervenants : F. Jamin, S. El Youssoufi

Doctorants : F.Z. El Korchi, D. Kara, A. Ouguemat

Cet axe vient en prolongement des travaux antérieurs des membres de l'équipe en géotechnique. Trois projets ont été initiés. Le premier, en 2012, concerne une thèse (F.Z. El Korchi) portant sur l'évolution de la rhéologie des sols granulaires lors de processus d'imbibition ou de drainage d'eau, avec un cofinancement du Labex Numev et du gouvernement Marocain, et une collaboration avec le LMS de l'EPFL (L. Laloui). Les deux autres projets, initiés en 2013, ont une orientation applicative relevant de transfert de technologie. Ils portent sur l'étude au laboratoire de deux techniques de traitement

des sols compressibles afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques : (i) La technique par colonnes ballastées dans le cadre de la thèse de D. Kara en collaboration avec l'université Tizi-Ouzou UMMTO en Algérie (Pr R. Bahar), en vue du renforcement de sols à faibles performances mécaniques. (ii) La technique de compactage à très faibles teneurs en eau dans le cadre de la thèse de A. Ouguemat en collaborations avec la même université (Pr A. Bouheraoua), en vue du réemploi des sols de site en remblais d'infrastructures de transport.

5.7 Processus évolutifs

5.7.1 Fragmentation

Intervenants : F. Radjai, E. Azéma

Doctorants : D.-H. Nguyen

L'effet de la fragmentation des particules sur la compaction et le comportement en cisaillement des matériaux granulaires reste mal compris. L'objectif des études menées avec le CEA (P. Sornay) sur ce thème est de mieux comprendre les phénomènes survenus lors de la fabrication des ébauches crues de combustible nucléaire. Plusieurs modèles de fragmentation des particules sont en cours d'étude. Le processus est intimement corrélé avec les chaînes de force et il dépend des facteurs tels que les formes et tailles initiales des particules. Nos simulations montrent que, en raison des chaînes de forces, la fragmentation peut entraîner la pulvérisation de certaines particules alors même que d'autres particules restent intacts. Ces travaux sont menés en parallèle avec une thèse expérimentale au CEA et un travail numérique-expérimental dans le cadre de notre projet Ecos-Nord (N. Estrada).

5.7.2 Agglomération

Intervenants : F. Radjai, E. Azéma

Doctorants : N. Berger

La granulation est un processus complexe qui est utilisé par ArcelorMittal pour la fabrication des agglomérats de grande taille destinés à haut fourneau à partir de particules fines de minerais. Le but des études numériques en cours en collaboration avec ArcelorMittal (J.-F. Douce) est de comprendre les conditions nécessaires pour la nucléation des agglomérats et leur croissance. Les forces capillaires jouent un rôle majeur dans ce procédé et la compréhension de leur effet implique une étude de la rhéologie des écoulements de grains cohésifs en fonction du taux de cisaillement. En parallèle, des expériences sont réalisées dans un tambour tournant pour la validation des simulations.

5.7.3 Broyage

Intervenants : M. Renouf

Doctorants : V.-H. Nhu, B. Gezaghgen

Sous certaines conditions, le processus de broyage permet de faire une analogie avec le problème de freinage. Ce processus met en compétition les deux items précédents, à savoir les processus de fragmentation et de ré-agglomération. Ce travail est mené avec MBD dans le cadre du projet ANR FReIN (LaMCos, I2SM). L'impact de la modélisation d'une particule (vue comme une collection d'éléments) est étudiée en focalisant sur les comportements volumiques des éléments (rigides ou déformables) et les comportements des lois d'interactions entre éléments (unilatérale, élastique, endommageable,...). Le processus de ré-agglomération est relié à des considérations physico-chimiques permettant de relier à la composition des particules. Les modèles sont testés également dans des processus dynamiques modèles et à l'échelle.

5.7.4 Tassement du ballast

Intervenants : F. Radjai

Doctorants : J.-. Quezada

L'étude du tassement du ballast ferroviaire sous l'effet d'un chargement cyclique dû au passage des trains est motivée par une future mise en place des TGV avec une vitesse commerciale de 360 km/h.

La couche de ballast est de faible épaisseur et confinée par des parois frottantes du blochet. Les paramètres qui contrôlent le tassement et sa variabilité ont fait l'objet d'une thèse avec la SNCF (G. Saussine) et LaMI (P. Breul). Avec un modèle réaliste de la forme des grains (polyèdres tirés d'une bibliothèque de grains de ballast digitalisés), une étude paramétrique systématique a été réalisée en appliquant des cycles de contrainte à une couche en faisant varier le rapport d'aspect et l'amplitude de la contrainte. Les analyses indiquent que le frottement avec le blochet conduit à une dépendance du taux de tassement du rapport d'aspect. Le tassement se caractérise par une densité de probabilité proportionnelle au tassement moyen avec une décroissance exponentielle. Des études expérimentales ont également été réalisées sur un banc d'essai d'échelle 1 à la SNCF accompagnée de mesures pénétrométrique (Panda) au cours du tassement. Ces analyses ont permis de déterminer la corrélation entre le tassement et les mesures pénétrométriques sur la ballast. La méthode mesure a fait l'objet d'un brevet.

5.7.5 Interaction Sol-Ballast

Intervenants : M. Renouf, F. Dubois

Doctorants : P. Tafforel

Un des challenges de la SNCF est de pouvoir introduire dans les simulations de voies la déformation du sol. Pour cela il faut pouvoir coupler correctement les approches discrète et continue dans un processus dynamique. Ce travail est directement lié à cette problématique en levant les verrous techniques (détection de contact, contrôle de l'énergie, dissipation) avant de procéder à une étude physique des phénomènes mis en jeu.

5.8 Thermique et dynamique du contact

Les méthodes par éléments discrets sont utilisées ici comme des méthodes sans maillage afin de modéliser un contact sous sollicitations tribologiques (forte pression et vitesse de cisaillement). De ce fait, via les lois d'interaction adéquates il est possible de modéliser un milieu équivalent à un continuum et de soumettre le même milieu à des conditions qui vont l'endommager.

5.8.1 Homogénéisation au contact

Intervenants : M. Renouf

Doctorants : V.-H. Nhu

Afin d'enrichir les modèles de contact utilisés dans des approches type éléments finis, une méthodologie basée sur des échanges entre approches discrète et continue est réalisée afin de faire remonter les à l'échelle globale les grandeurs moyennes obtenues à l'échelle locale et inversement se servir de la cinématique à l'échelle globale comme conditions limites à l'échelle locale.

5.8.2 Rhéologie et matériau bi-phasique

Intervenants : M. Renouf

Doctorants : M. Champagne

On s'intéresse ici à comprendre les mécanismes d'endommagement de matériau bi-phasique (matériau de friction) sous sollicitations tribologiques. L'influence de la différence de comportement de phase est étudiée ainsi que l'influence des propriétés des particules dégradées. Une étude statistique est réalisée afin de s'affranchir de la discrétisation discrète ainsi qu'une étude de convergence en taille de VER (collaboration MBD).

5.8.3 Comportement thermique au contact

Intervenants : M. Renouf

Doctorants : J. Rivière

Après avoir obtenu des milieux équivalents à un continuum d'un point de vue mécanique, la méthodologie est reproduite pour les aspects thermiques afin de pouvoir modéliser correctement les

échanges thermiques dans un contact en couplant à la fois des modèles thermiques continu et discret (collaboration MBD).

5.8.4 Couplage discret-continu

Intervenants : M. Renouf

Doctorants : V.-H. Nhu

Il s'agit ici d'enrichir la description des interfaces en couplant au coeur d'un même modèle approche discrète et continue. La méthodologie est appliquée à l'étude de la rhéologie de milieux discrets en contact avec une structure déformable plus ou moins élastique, et, dans l'objectif d'avoir des résultats plus qualitatifs, l'approche est comparée à une expérience modèle montrant une très bonne adéquation entre résultats numériques et expérimentaux (Projet DiNEET, ANR JCJC 0020-08).

5.9 Développements numériques

Le développement de nouveaux modèles numériques pour la simulation des matériaux granulaires complexes constitue un élément de recherche majeur de l'équipe PMMG. C'est pourquoi il est nécessaire d'insister sur l'autonomie souhaitée de l'équipe et sa contribution très importante à la notoriété du laboratoire dans ce domaine. Cette activité ne concerne pas seulement les aspects méthodologiques, qui trouvent leur origine dans le rôle précurseur de J. J. Moreau et M. Jean par l'invention de la méthode Contact Dynamics (CD) ou les travaux algorithmiques de P. Alart, mais elle réside avant tout dans les modélisations physiques mises en œuvre pour la simulation des milieux et des processus très variés et complexes. Nos travaux numériques reflètent ainsi la physique même des milieux granulaires. On peut citer à ce titre le cadre proposé pour l'étude de l'effet de la forme des particules. Ce cadre, qui a conduit à la publication d'un article commun entre 4 laboratoires, a mis en œuvre des simulations par différentes méthodes (CD et MD) et par différents algorithmes et les résultats ont permis de comparer ces méthodes. De même, un benchmark a été proposé pour la simulation de l'effondrement des massifs granulaires dans un liquide avec deux méthodes très différentes (FEM-CD) et (LBM-MD). La comparaison entre ces méthodes est rendue possible par la définition des grandeurs sans dimension et des descripteurs précis du phénomène. Les développements ainsi réalisés dans diverses actions de l'équipe couvrent une large gamme de méthodes (LEM pour les particules déformables, couplage discret-continu, LBM polyphasique avec la thermodynamique de transition de phase et avec surface libre, couplages CD-LBM et MD-LBM, fragmentation des particules, formes variées des particules et classes granulométriques contrôlées statistiquement) qui témoignent de la fécondité de l'approche mise en œuvre. Le site www.cgp-gateway reflète à la fois nos développements et nos études dans un contexte élargi qui devrait permettre de mutualiser nos méthodes et résultats avec des partenaires académiques.

Bibliographie

Articles dans des revues

- [A.1] **E. Azéma, F. Radjai**, R. Peyroux, V. Richefeu, and G. Saussine. Short-time dynamics of a packing of polyhedral grains under horizontal vibrations. *European Physical Journal E*, 26 :327–335, July 2008.
- [A.2] **J.Y. Delenne**, Y. Haddad, **J.C. Bénet**, and J. Abécassis. Use of mechanics of cohesive granular media for analysis of hardness and vitreousness of wheat endosperm. *Journal of Cereal Sciences*, 47 :438–444, 2008. **.
- [A.3] P. Devillers, **M.S. El Youssoufi**, and **C. Saix**. A framework for the construction of state surfaces of unsaturated soils in the elastic domain. *Water Resources Research*, 44 :1–10, 2008.
- [A.4] N. Estrada, A. Taboada, and **F. Radjai**. Shear strength and force transmission in granular media with rolling resistance. *Physical Review E : Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 78 :021301, 2008.
- [A.5] **F. Radjai**. Contact dynamics method. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 12 :871–900, 2008.
- [A.6] V. Topin, **F. Radjai**, **J.Y. Delenne**, A. Sadoudi, and F. Mabilbe. Wheat endosperm as a cohesive granular material. *Journal of Cereal Science*, 47 :347–356, 2008.
- [A.7] **E. Azéma, F. Radjai**, and G. Saussine. Quasistatic rheology, force transmission and fabric properties of a packing of irregular polyhedral particles. *Mechanics of Materials*, 41 :729–741, 2009.
- [A.8] **J.Y. Delenne**, V. Topin, and **F. Radjai**. Failure of cemented granular materials under simple compression - Experiments and numerical simulations. *Acta Mechanica*, 205 :9–21, 2009.
- [A.9] M. Mansouri, **J.Y. Delenne**, **M.S. El Youssoufi**, and A. Séridi. A 3D DEM-LBM Approach for the Assesment of the Quick Condition for Sands. *C. R. Mecanique*, 337 :675–681, 2009.
- [A.10] H. Péron, **J.Y. Delenne**, L. Laloui, and **M.S. El Youssoufi**. Discrete element modelling of drying shrinkage and cracking of fine-grained soils Computers and Geotechnics. *Computers and Geotechnics*, pages 61–69, 2009.
- [A.11] **F. Radjai** and **E. Azéma**. Shear strength of granular materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13 :203–218, 2009.
- [A.12] **F. Radjai** and V. Richefeu. Bond anisotropy and cohesion of wet granular materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A (1887-1895)*, 367 :5123–5138, December 2009.
- [A.13] **F. Radjai** and V. Richefeu. Contact dynamics as a nonsmooth discrete element method. *Mechanics of Materials*, 41 :715–728, 2009.
- [A.14] **F. Radjai** and R. Vincent. Contact dynamics as a nonsmooth discrete element method. *Mechanics of Materials*, 41 :715–728, 2009.
- [A.15] V. Richefeu, **M.S. El Youssoufi**, **E. Azéma**, and **F. Radjai**. Force transmission in dry and wet granular media. *Powder Technology*, 190 :258–263, March 2009.

- [A.16] T. Vincent, **F. Radjai**, and **J.Y. Delenne**. Subparticle stress fields in granular solids. *Physical Review E*, 79 :051302, 2009.
- [A.17] T. Vincent, **F. Radjai**, **J.Y. Delenne**, and M. Frédéric. Mechanical modeling of wheat hardness and fragmentation. *Powder Technology*, 190 :215–220, 2009.
- [A.18] C. Voivret, **F. Radjai**, **J.Y. Delenne**, and **M.S. El Youssoufi**. Multiscale Force Networks in Highly Polydisperse Granular Media. *Physical Review Letters*, 102 :178001, 2009.
- [A.19] F. Augier, F. Idoux, and **J.Y. Delenne**. Numerical simulation of transfer and transport properties inside packed beds of spherical particles. *Chemical Engineering Science*, pages 1055–1064, 2010.
- [A.20] **E. Azéma** and **F. Radjai**. Stress-strain behavior and geometrical properties of packings of elongated particles. *Physical Review E : Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 81 :051304, February 2010.
- [A.21] J.-P. Gras, **J.Y. Delenne**, and **M.S. El Youssoufi**. Approche micromécanique du phénomène de rétention d’eau dans un milieu granulaire polydisperse. *Revue de Mécanique Appliquée et Théorique*, 2 :177–187, 2010.
- [A.22] S. Salager, **M.S. El Youssoufi**, and **C. Saix**. Effect of temperature on water retention phenomena in deformable soils : theoretical and experimental aspects. *European Journal of Soil Science*, 61 :97–107, February 2010.
- [A.23] S. Salager, **M.S. El Youssoufi**, and **C. Saix**. Definition and experimental determination of a soil-water retention surface. *Canadian Geotechnical Journal*, 47 :609–622, 2010.
- [A.24] **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, **M.S. El Youssoufi**, and **F. Radjai**. From liquid to solid bonding in cohesive granular media. *Mechanics of Materials*, 43 :529–537, October 2011. **.
- [A.25] **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, **M.S. El Youssoufi**, and **F. Radjai**. Compressive strength of an unsaturated granular material during cementation. *Powder Technology*, 208 :308–311, March 2011. **.
- [A.26] N. Estrada, **E. Azéma**, **F. Radjai**, and A. TABOADA. Identification of rolling resistance as a shape parameter in sheared granular media. *Physical Review E : Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 84 :011306, July 2011.
- [A.27] J.-P. Gras, **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, and **M.S. El Youssoufi**. DEM and experimental analysis of the water retention curve in polydisperse granular media. *Powder Technology*, 2 :296–300, 2011. **.
- [A.28] B. Saint-Cyr, **J.Y. Delenne**, C. Voivret, **F. Radjai**, and P. Sornay. Rheology of granular materials composed of nonconvex particles. *Physical Review E*, 84 :041302, 2011.
- [A.29] V. Topin, **F. Radjai**, and **J.Y. Delenne**. Stress fields in granular solids : Effect of composition. *Powder Technology*, 208 :568–573, 2011.
- [A.30] R. Affes, **J.Y. Delenne**, Y. Monerie, V. Topin, and **F. Radjai**. Tensile strength and fracture of cemented granular aggregates. *Eur. Phys. J. E*, 35 :117, 2012.
- [A.31] **E. Azéma**, Y. Descantes, N. Roquet, J.-N. Roux, and F. Chevoir. Discrete simulation of dense flows of polyhedral grains down a rough inclined plane. *Physical Review E*, 86 :1–14, July 2012.
- [A.32] **E. Azéma**, N. Estrada, and **F. Radjai**. Nonlinear effects of particle shape angularity in sheared granular media. *Physical Review E*, 86 :1–15, October 2012.
- [A.33] **E. Azéma** and **F. Radjai**. Force chains and contact network topology in sheared packings of elongated particles. *Physical Review E*, 85 :031303, March 2012.
- [A.34] Q. Juan Carlos, B. Pierre, S. Gilles, and **F. Radjai**. Stability, deformation and variability of granular fills composed of polyhedral particles. *Phys. Rev. E*, 86 :031308, 2012.
- [A.35] **F. Radjai**, **J.Y. Delenne**, **E. Azéma**, and S. Roux. Fabric evolution and accessible geometrical states in granular materials. *Granular Matter*, 14 :259, February 2012.

- [A.36] B. Saint-Cyr, S. Krzysztow, C. Voivret, **E. Azéma**, V. Richefeu, **J.Y. Delenne**, G. Combe, N.-L. Cécile, V. Pascal, S. Philippe, C. Marie, and **F. Radjai**. Particle shape dependence in 2D granular media. *EPL*, 98 :44008, 2012.
- [A.37] V. Topin, Y. Monerie, F. Perales, and **F. Radjai**. Collapse dynamics and runout of dense granular materials in a fluid. *Physical Review Letters*, 109 :188001, 2012.
- [A.38] V. Visseq, A. Martin, D. Iceta, **E. Azéma**, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Dense granular dynamics analysis by a domain decomposition approach. *Computational Mechanics*, 49 :709–723, April 2012. ***.
- [A.39] **E. Azéma**, **F. Radjai**, and **F. Dubois**. Packings of irregular polyhedral particles : Strength, structure, and effects of angularity. *Physical Review E*, 87 :1–15, 2013. **.
- [A.40] **E. Azéma**, **F. Radjai**, B. Saint-Cyr, **J.Y. Delenne**, and P. Sornay. Rheology of three-dimensional packings of aggregates : Microstructure and effects of nonconvexity. *Physical Review E*, 87 :1–15, May 2013.
- [A.41] M. Boton, **E. Azéma**, N. Estrada, **F. Radjai**, and A. Lizcano. Quasistatic rheology and microstructural description of sheared granular materials composed of platy particles. *Physical Review E*, 87 :1–15, March 2013.
- [A.42] J.-P. Gras, **J.Y. Delenne**, and **M.S. El Youssoufi**. Study of capillary interaction between two grains : a new experimental device with suction control. *Granular Matter*, page Voir DOI, 2013.
- [A.43] N. Hadda, F. Nicot, F. Bourrier, L. Sibille, **F. Radjai**, and F. Darve. Micromechanical analysis of second order work in granular media. *Granular Matter*, 15 :221–235, 2013.
- [A.44] T. Keller, M. Lamandé, S. Peth, M. Berli, J.-Y. Delenne, W. Baumgarten, W. Rabbel, **F. Radjai**, J. Rajchenbach, A.P.S. Selvadurai, and D. Or. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. *Soil and Tillage Research*, 128 :61–80, 2013.
- [A.45] B. Saint-Cyr, **F. Radjai**, **J.Y. Delenne**, and P. Sornay. Cohesive granular materials composed of nonconvex particles. *Physical Review E*, 87 :052207, 2013.

Participations à un ouvrage

- [B.1] B. Cambou, M. Jean, and **F. Radjai**. *Micromechanics of granular materials*. Iste-Wiley, 2009.
- [B.2] **M.S. El Youssoufi**, **F. Radjai**, V. Richefeu, and **F. Soulié**. Capillary cohesion of wet granular media. In *Micromechanics of Failure in Granular Geomaterials*, page 37. Wiley-Iste, 2009.
- [B.3] **F. Radjai** and L. Jack. Experimental and Numerical Analysis of Local Variables in Granular Materials. In *Micromechanics of granular materials*, pages 1–49. ISTE, 2009.
- [B.4] **J.Y. Delenne**, **M.S. El Youssoufi**, V. Richefeu, V. Topin, and **F. Radjai**. Modélisation numérique des interactions cohésives. In *Modélisation numérique discrète des matériaux granulaires*, pages –. Lavoisier, Hermès, 2010.
- [B.5] **F. Radjai** and D. Frédéric. *Modélisation numérique discrète des matériaux granulaires*. ISTE, 2010.
- [B.6] **F. Radjai**, V. Topin, V. Richefeu, C. Voivret, **J.Y. Delenne**, **E. Azéma**, and **M.S. El Youssoufi**. Force Transmission in Cohesive Granular Media. In *Mathematical Modeling and Physical Instances of granular Flows*, pages 240–260. AIP, 2010.
- [B.7] **F. Radjai** and C. Voivret. Conditions aux limites périodiques. In *Modélisation Numérique Discrète des Matériaux Granulaires*, pages 203–222. Iste, 2010.
- [B.8] C. Voivret, **F. Radjai**, and **J.Y. Delenne**. Méthodes d'assemblage de particules. In *Modélisation numérique discrète des matériaux granulaires*, pages 137–170. Iste, 2010.
- [B.9] R. Affes, T. Vincent, **J.Y. Delenne**, Y. Monerie, and **F. Radjai**. Modeling porous granular aggergatess. In *Advances in bifurcation and degradation in geomaterials*, pages 249–255. Springer, 2011.

- [B.10] **E. Azéma** and **F. Radjai**. Microscopic origins of shear strength in packings composed of elongated particles. In *Advances in bifurcation and degradation in geomaterials*, pages 21–29. Springer, 2011.
- [B.11] **J.Y. Delenne**, V. Richefeu, V. Topin, and **F. Radjai**. Numerical modeling of cohesive interactions. In *Discrete Numerical Modeling of Granular Materials*. Wiley ISTE, 2011.
- [B.12] **F. Radjai** and D. Frédéric. *Discrete-element modeling of granular materials*. Wiley-Iste, 2011.
- [B.13] **F. Radjai** and C. Voivret. Periodic boundary conditions. In *Discrete-element modeling of granular materials*, pages 181–198. Wiley-Iste, 2011.
- [B.14] C. Voivret, **F. Radjai**, and **J.Y. Delenne**. Particle assembling methods. In *Discrete-element modeling of granular materials*, pages 123–151. Wiley-Iste, 2011.
- [B.15] B. Cambou, M. Jean, and **F. Radjai**. *Matériaux granulaires - Modélisation et simulation numérique*. Hermès-Lavoisier, 2012.
- [B.16] **F. Radjai** and J. Lanier. Variables locales dans les milieux granulaires. In *Matériaux granulaires - Modélisation et simulation numérique*, page 1. Hermès-Lavoisier, 2012.

Communications avec actes dans des colloques

- [C1.1] **E. Azéma**, **F. Radjai**, R. Peyroux, **F. Dubois**, and G. Saussine. Vibrational dynamics of 3D granular media composed with polyhedral grains—Dinámica vibracional de un medio granular 3D compuesto de partículas poliédricas. In *IX Congreso de Geotecnia, Sociedad Colombiana de geotecnia*, page 8, Bogotá, Colombie, September 2008.
- [C1.2] G. Saussine, **E. Azéma**, P.E. Gautier, R. Peyroux, and **F. Radjai**. Numerical modeling of the tamping operation by Discrete Element Approach. In *World Congress Rail Research*, pages 1–9, Corée, République De, 2008.
- [C1.3] **E. Azéma**, **F. Radjai**, R. Peyroux, and G. Saussine. Influence of particle shape on shear stress in granular media. In *Traffic and Granular Flow '07*, pages p497–505, Paris, France, 2009.
- [C1.4] **E. Azéma**, **F. Radjai**, and G. Saussine. Quasistatic behavior and force transmission in packing of irregular polyhedral particles. In *Proceedings of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, pages 273–276, Golden, Colorado, États-Unis, July 2009.
- [C1.5] **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, **M.S. El Youssoufi**, and **F. Radjai**. Compressive strength of an unsaturated granular material during cementation. In *CD-Rom*, Montpellier, France, 2009.
- [C1.6] **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, **M.S. El Youssoufi**, and **F. Radjai**. Analyse expérimentale et numérique de la résistance mécanique d'un matériau granulaire en cours de cimentation. In *Actes du Colloque Sciences et Technologie des Poudres et Matériaux Frittés 2009*, page 1, Montpellier, France, 2009.
- [C1.7] **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, **M.S. El Youssoufi**, and **F. Radjai**. A numerical model for transition from liquid to solid bonding in cohesive granular media. In *Powders and grains 2009*, pages 893–896, Golden, États-Unis, 2009. AIP Conference Proceedings, Springer.
- [C1.8] A. Martin, **F. Dubois**, **F. Radjai**, and Y. Monerie. Modélisation numérique de mélanges grains-gaz. Application aux écoulements. In *CD-Rom*, Montpellier, France, 2009.
- [C1.9] B. Saint-Cyr, C. Voivret, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and P. Sornay. Effet de la non-convexité des particules sur le comportement des milieux granulaires. In *CD-Rom*, Montpellier, France, 2009.
- [C1.10] B. Saint-Cyr, C. Voivret, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and P. Sornay. Effect of shape nonconvexity on the shear strength of granular media. In *Powders and grains 2009*, pages 389–392, Golden, États-Unis, 2009.
- [C1.11] V. Topin, **J.Y. Delenne**, and **F. Radjai**. Modélisation mécanique de la fissuration des matériaux granulaires cimentés. In *CD-Rom*, Montpellier, France, 2009.

- [C1.12] C. Voivret, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and **M.S. El Youssoufi**. Force transmission in highly polydisperse granular media. In *Powders and Grains 2009*, pages 297–300, Golden, États-Unis, 2009.
- [C1.13] C. Voivret, **F. Radjai**, **J.Y. Delenne**, and **M.S. El Youssoufi**. Comportement mécanique des matériaux granulaires à grande polydispersité. In *CD-Rom*, Montpellier, France, 2009.
- [C1.14] **E. Azéma** and **F. Radjai**. Microscopic Origins of Shear Strength in Packings Composed of Elongated Particles. In *Advances in bifurcation and degradation*, pages 1–7, France, 2010.
- [C1.15] **E. Azéma**, **F. Radjai**, and **F. Dubois**. Numerical Simulations of Granular Media Composed with Irregular Polyhedral Particles : Effect of Particles' Angularity. In *II International Conference on Particle-based Methods - Fundamentals and Applications*, pages 1–7, Espagne, 2011.
- [C1.16] B. Saint-Cyr, **E. Azéma**, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and P. Sornay. Effect of Particle Shape non-Convexity on the Rheology of Granular Media : 3D Contact Dynamics Simulations. In *II International Conference on Particle-based Methods - Fundamentals and Applications*, pages 1–7, Espagne, 2011.
- [C1.17] V. Topin, **F. Dubois**, Y. Monerie, F. Perales, **F. Radjai**, and A. Wachs. Modélisation numérique et étude de l'effondrement d'une colonne de grain dans un fluide. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.18] L. Amarsid, C. Delenne, **J.Y. Delenne**, V. Guinot, and **F. Radjai**. Surface wave generation by seabed collapse simulated by the coupled Lattice Boltzmann/Discrete Element Method. In *Proceedings of 10th International conference on hydroinformatics*, page 3, Hamburg, Allemagne, 2012.
- [C1.19] **E. Azéma** and **F. Radjai**. Influence of particle shape on plastic granular flows. In *IUTAM Symposium on MOBILE PARTICULATE SYSTEMS : Kinematics, Rheology and Complex Phenomena*, page 1, Inde, 2012.
- [C1.20] M. Coumba, **M. Delenne**, and Y. Berthier. Advances in the modelling of carbon/carbon composite under tribological constraints. In *EuroBrake 2012 Conference Proceedings*, page Clé USB 7p., Allemagne, 2012.
- [C1.21] T. Hueckel, B. Mielniczuk, and **M.S. El Youssoufi**. Evolution and failure of liquid bridges between grains due to evaporation and due to extension. In *Geophysical Research Abstracts, Vol. 14*, page 14462, Vienne, Autriche, 2012.
- [C1.22] B. Mielniczuk, T. Hueckel, and **M.S. El Youssoufi**. Micro-scale testing of capillary bridge evolution due to evaporation. In *Multiphysical Testing of Soils and Shales*, pages 233–239, Lausanne, Suisse, 2012. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [C1.23] **E. Azéma**, N. Estrada, and **F. Radjai**. Shear strength, force distributions and friction mobilization in sheared packings composed of angular particles. In *AIP Conference Proceedings Powder and Grains 2013*, pages 511–514, Sydney, Australie, 2013.
- [C1.24] M. Botton, **E. Azéma**, N. Estrada, **F. Radjai**, and A. Lizcano. Shear strength and micro-structure of 3D assemblies of platy particles. In *AIP Conference Proceedings*, pages 519–522, Sydney, Australie, 2013.
- [C1.25] G. Combe, C. Nouguier-lehon, **E. Azéma**, K. Szarf, B. Saint-Cyr, M. Chaze, **F. Radjai**, P. Villard, **J.Y. Delenne**, V. Richefeu, P. Sornay, and C. Voivret. A benchmark for particle shape dependence. In *AIP Conference Proceedings*, pages 883–886, Sydney, Australie, 2013.
- [C1.26] **J.Y. Delenne**, V. Richefeu, and **F. Radjai**. Capillary states of granular materials in the funicular state. In *Powders and Grains 2013 : Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, pages 1023–1027, Sydney, Australie, 2013. AIP.
- [C1.27] N. Estrada, **E. Azéma**, **F. Radjai**, and A. TABOADA. Comparison of the effects of rolling resistance and angularity in sheared granular media. In *AIP Conference Proceedings*, pages 891–894, Sydney, Australie, 2013.

- [C1.28] N. Hadda, F. Nicot, L. Sibille, **F. Radjai**, A. Tordesillas, and F. Darve. A multiscale description of failure in granular materials. In *Powders and Grains 2013 : Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, pages 585–589, Sydney, Australie, 2013. AIP.
- [C1.29] L. B. Hu, M. Monfared, B. Mielniczuk, L. Laloui, T. Hueckel, and **M.S. El Youssoufi**. Multi-scale approach to cracking criteria for drying soils. In *Geotechnical Special Publication GSP 231*, pages 838–845, San Diego, États-Unis, 2013.
- [C1.30] T. Hueckel, B. Mielniczuk, and **M.S. El Youssoufi**. Micro-scale study of rupture in desiccating granular media. In *Geotechnical Special Publication GSP 231*, pages 808–817, San Diego, États-Unis, 2013.
- [C1.31] F. Massi, A. Saulot, **M. Delenne**, and G. Messenger. Simulation of dynamic instabilities induced by sliding contacts. In *Proceedings of the XV International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics*, pages Cd–Rom 9p., Brésil, February 2013.
- [C1.32] J. C. Quezada, G. Saussine, P. Breul, and **F. Radjai**. Penetration strength of coarse granular materials from DEM simulations. In *Powders and Grains 2013 : Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, pages 241–245, Sydney, Australie, 2013. AIP.
- [C1.33] J. C. Quezada, G. Saussine, P. Breul, and **F. Radjai**. Settlement statistics of a granular layer composed of polyhedral particles. In *Powders and Grains 2013 : Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, pages 333–337, Sydney, Australie, 2013. AIP.
- [C1.34] **F. Radjai**, V. Topin, F. Perales, and Y. Monerie. Tumbling sandpiles in a fluid. In *Powders and Grains 2013 : Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, pages 662–666, Sydney, Australie, 2013. AIP.

Communications sans actes dans des colloques

- [C2.1] **F. Radjai**. Origines microscopiques de la rhéologie quasi-statique des matériaux granulaires. In *Colloque du GdR MeGe (Couplages multi-physiques et multi-échelles en mécanique géo-environnementale)*, La Rochelle, France, June 2008.
- [C2.2] V. Topin, **J.Y. Delenne**, and **F. Radjai**. Stress transmission and crack formation in cemented granular media. In *Inaugural International Conference of the Engineering Mechanics Institute (EM08)*, Minnesota, États-Unis, May 2008.
- [C2.3] C. Voivret, **J.Y. Delenne**, **M.S. El Youssoufi**, and **F. Radjai**. Microstructure and force transmission in highly polydisperse granular media. In *Inaugural International Conference of the Engineering Mechanics Institute (EM08)*, Minnesota, États-Unis, May 2008.
- [C2.4] **F. Dubois**, A. Martin, Y. Monerie, and **F. Radjai**. Discrete element method with particle-gas interactions. In *Alert Workshop 2009*, Aussois, France, October 2009.
- [C2.5] A. Martin, **F. Dubois**, **F. Radjai**, and Y. Monerie. Statistique de blocage dans un écoulement de silo. In *19ieme Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, August 2009.
- [C2.6] R. Perales, G. Saussine, and **F. Radjai**. Optimizing the tamping process to reduce track settlement. In *7th EUROMECH Solid Mechanics Conference (ESMC2009)*, Lisbonne, Portugal, September 2009.
- [C2.7] **F. Radjai**. Une équation pour l'évolution de la texture dans les milieux granulaires. In *Atelier thématique du GdR MeGe : Transferts réactifs / transferts couplés / Couplages poromécaniques*, La Rochelle, France, June 2009.
- [C2.8] B. Saint-Cyr, C. Voivret, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and P. Sornay. Le comportement quasi-statique des milieux granulaires à particules non-convexes. In *19ieme Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, August 2009.

- [C2.9] V. Topin, **J.Y. Delenne**, and **F. Radjai**. Modélisation des matériaux granulaires cimentés. In *9ème Congrès de Mécanique*, Marrakech, Maroc, April 2009.
- [C2.10] V. Topin, **J.Y. Delenne**, and **F. Radjai**. Stress fields in granular solids. In *Colloids, Grains and Dense Suspensions : under Flow and under Arrest*, Royal Society, Londres, France, March 2009.
- [C2.11] V. Topin, **F. Radjai**, and **J.Y. Delenne**. Transmission des contraintes dans les milieux granulaires solides. In *19ième Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, August 2009.
- [C2.12] C. Voivret, **J.Y. Delenne**, **M.S. El Youssoufi**, and **F. Radjai**. Texture et comportement des matériaux polydispersés. In *19ième Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France, August 2009.
- [C2.13] C. Voivret, **F. Radjai**, **J.Y. Delenne**, and **M.S. El Youssoufi**. Multiscale force network in highly polydisperse granular media. In *Colloids, Grains and Dense Suspensions : under Flow and under Arrest*, Royal Society, Londres, Royaume-Uni, March 2009.
- [C2.14] R. Affes, V. Topin, **J.Y. Delenne**, Y. Monerie, and **F. Radjai**. Régimes de rupture en 3D influence des interfaces et de la matrice. In *Journées thématiques du GdR MeGe : Approches multi-échelles et couplages multi-physiques en géomécanique*, Lille, France, October 2010.
- [C2.15] **F. Radjai** and L. Staron. Caractère multi-échelle des contraintes à l'approche d'une instabilité. In *Journées thématiques du GdR MeGe Approches multi-échelles et couplages multi-physiques en géomécanique*, Lille, France, March 2010.
- [C2.16] R. Affes, V. Topin, **J.Y. Delenne**, Y. Monerie, and **F. Radjai**. Simulation of crack propagation in cohesive granular materials. In *22nd ALERT workshop*, Aussois, France, October 2011.
- [C2.17] R. Affes, V. Topin, **J.Y. Delenne**, Y. Monerie, and **F. Radjai**. Fissuration des matériaux à inclusions granulaires : effet de la microstructure. In *20èmes Congrès Français de Mécanique*, Besançon, France, August 2011.
- [C2.18] R. Affes, V. Topin, **J.Y. Delenne**, Y. Monerie, and **F. Radjai**. Failure of granular solids : stress fields and damage at the sub-particle scale. In *9th International Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials*, Porquerolles, France, May 2011.
- [C2.19] R. Affes, V. Topin, Y. Monerie, and **F. Radjai**. Failure in porous granular aggregates. In *International Conference on particle-based Methods-Fundamentals and Applications (Particles 2011)*, Barcelone, Espagne, October 2011.
- [C2.20] **E. Azéma** and **F. Radjai**. Rhéologie des milieux granulaires composés de particules polydispersées - effet de l'angularité. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2011.
- [C2.21] M. Botton, A. Lizcano, **E. Azéma**, and **F. Radjai**. Numerical analysis of the quasi-static behavior of clay by DEM. In *22nd ALERT workshop*, Aussois, France, October 2011.
- [C2.22] M. Botton, A. Lizcano, **E. Azéma**, and **F. Radjai**. Discrete modelling of quasi-static behaviour of clay particles. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2011.
- [C2.23] **J.Y. Delenne**, M. Mansouri, **F. Radjai**, and **M.S. El Youssoufi**. Onset of immersed granular avalanches by DEM-LBM approach. In *9th International Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials*, Porquerolles, France, May 2011.
- [C2.24] **J.Y. Delenne** and **F. Radjai**. Discrete-element modeling of immersed granular avalanches. In *Earth Surface Sedimentary Flows Symposium*, Bristol, France, April 2011.
- [C2.25] **J.Y. Delenne**, V. Richefeu, and **F. Radjai**. Condensation capillaire dans les milieux granulaires. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2011.
- [C2.26] **J.Y. Delenne**, V. Richefeu, **F. Radjai**, and **F. Soulié**. Modeling of liquid equilibrium states in granular materials. In *GM3 Geo-mechanics : From micro to macro, UK 9th Travelling Workshop*, Londres, Royaume-Uni, December 2011.

- [C2.27] **J.Y. Delenne**, **F. Soulié**, and **F. Radjai**. Phénomènes granulaires dans l'environnement. In *59ème Congrès de l'Union des Professeurs de Physique et Chimie (UdPPC)*, Montpellier, France, October 2011.
- [C2.28] N. Estrada, **E. Azéma**, A. Taboada, and **F. Radjai**. Identification du frottement de roulement comme un paramètre de forme dans les milieux granulaires. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2011.
- [C2.29] D. Iceta, V. Visseq, **E. Azéma**, and **P. Alart**. Influence of Domain Decomposition Method on the solution of a simple granular test via the N.S.C.D. In *ICCCM 2011 - II International Conference on Computational Contact Mechanics*, Allemagne, June 2011.
- [C2.30] B. Mielniczuk, **M.S. El Youssoufi**, and T. Hueckel. Modes of capillary bridge evolution during evaporation. In *ALERT Workshop 2011*, Aussois, France, October 2011.
- [C2.31] P. Mutabaruka, **J.Y. Delenne**, and **F. Radjai**. Simulation des avalanches sous-marines. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2011.
- [C2.32] P. Mutabaruka, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and K. Soga. Numerical modeling of underwater avalanches. In *International Conference on particle-based Methods-Fundamentals and Applications (Particles 2011)*, Barcelone, Espagne, October 2011.
- [C2.33] P. Mutabaruka, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and K. Soga. Numerical modeling of submarine avalanches. In *22nd ALERT workshop*, Aussois, France, October 2011.
- [C2.34] P. Mutabaruka, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and K. Soga. Modélisation numérique des matériaux granulaires immergés : application aux avalanches sous-marines. In *20ème Congrès Français de Mécanique*, Besançon, France, August 2011.
- [C2.35] V. H. Nhu, A. Saulot, and **M. Delenne**. Influence of Wear Particles on Contact Dynamics. In *International Joint Tribology Congress*, Los Angeles, États-Unis, October 2011.
- [C2.36] F. Nicot, N. Hadda, F. Bourrier, L. Sibille, **F. Radjai**, and F. Darve. Microstructural basis of the second-order works in granular media. In *22nd ALERT workshop*, Aussois, France, October 2011.
- [C2.37] W. Oquendo, J. D. Munoz Castano, and **F. Radjai**. Statistics of void volumes for isotropic states of granular materials. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2011.
- [C2.38] W. Oquendo, J. D. Munoz, and **F. Radjai**. Configurational temperature of granular media in the critical state from 3D-DEM simulations. In *22nd ALERT workshop*, Aussois, France, October 2011.
- [C2.39] R. Perales, G. Saussine, N. Milesi, and **F. Radjai**. Numerical investigation of the tamping process. In *9th World Congress on Railway Research-WCRR*, Lille, France, May 2011.
- [C2.40] J. C. Quezada, **F. Radjai**, P. Breul, and G. Saussine. Creep behaviour of confined layers of polyhedral grains. In *22nd ALERT workshop*, Aussois, France, October 2011.
- [C2.41] J. C. Quezada, G. Saussine, **F. Radjai**, and P. Breul. Creep behavior of confined layers of polyhedral particles. In *International Conference on particle-based Methods- Fundamentals and Applications (Particles 2011)*, Barcelone, Espagne, March 2011.
- [C2.42] **F. Radjai**. Etats géométriques accessibles dans les milieux granulaires. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2011.
- [C2.43] **F. Radjai**. Simulations numériques discrètes : modéliser les mouvements collectifs des grains. In *Écoulements granulaires (cours organisé par le X Collège de Polytechnique)*, Paris, France, June 2011.
- [C2.44] **F. Radjai** and **E. Azéma**. Influence de la morphologie des grains sur la texture et le comportement des milieux granulaires. In *Atelier Mécanique et Géosciences du GdR MeGe*, Ecole Normale Supérieure, Paris, France, March 2011.
- [C2.45] **F. Radjai**, V. Topin, Y. Monerie, F. Perales, A. Wachs, and **F. Dubois**. Contact Dynamics with hydrodynamic interactions applied to granular collapse in a fluid. In *Earth Surface Sedimentary Flows*, Bristol, Royaume-Uni, April 2011.

- [C2.46] V. Topin, **F. Dubois**, Y. Monerie, F. Perales, **F. Radjai**, and A. Wachs. Modélisation numérique et étude de l'effondrement d'une colonne de grains dans un fluide. In *10ime Colloque National en Calcul des Structures*, Giens, France, May 2011.
- [C2.47] **E. Azéma**, J.-N. Roux, and **F. Radjai**. Critical states and stress-dilatancy relations in model granular materials : DEM studies. In *23rd ALERT Workshop*, Aussois, France, October 2012.
- [C2.48] N. Berger, **E. Azéma**, **F. Radjai**, and J.-F. Douce. Agglomeration of wet granular materials during dense flow. In *23rd ALERT Workshop*, Aussois, France, October 2012.
- [C2.49] N. Berger, **E. Azéma**, **F. Radjai**, and J.-F. Douce. Agglomération des matériaux granulaires par forces capillaires. In *13èmes Journées de Matière Condensée (JMC13)*, Montpellier, France, August 2012.
- [C2.50] E. Chichti, M. GEORGE, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and V. LULLIEN-PELLERIN. Micro-mechanical experiments and modeling of wheat fractionation. In *13èmes Journées de Matière Condensée (JMC13)*, Montpellier, France, August 2012.
- [C2.51] C. Delenne, L. Amarsid, **J.Y. Delenne**, V. Guinot, and **F. Radjai**. Modélisation à surface libre par la méthode LBM : application à la rupture de barrage. In *Colloque Modélisation numérique des mélanges fluides-grains*, Montpellier, France, October 2012.
- [C2.52] **J.Y. Delenne**, V. Richefeu, **F. Radjai**, and **F. Soulié**. Lattice Boltzmann modelling of liquid-gas phase changes in a granular material. In *International Symposium on Discrete Element Modelling of Particulate Media*, Birmingham, Royaume-Uni, March 2012.
- [C2.53] N. Hedda, F. Nicot, L. Sibile, **F. Radjai**, and F. Darve. The structural enigma of failure in discrete materials. In *13imes Journées de Matière Condensée (JMC13)*, Montpellier, France, August 2012.
- [C2.54] P. Mutabaruka, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and K. Soga. Trigger mechanisms of underwater avalanches. In *Alert Workshop 2012*, Aussois, France, October 2012.
- [C2.55] P. Mutabaruka, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and K. Soga. Etude du comportement d'un mélange fluide-grains. In *13èmes Journées de Matière Condensée (JMC13)*, Montpellier, France, August 2012.
- [C2.56] J. Ngoma, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and P. Philippe. Instabilités hydrodynamiques dans un milieu granulaire immergé. In *13imes Journées de Matière Condensée (JMC13)*, Montpellier, France, August 2012.
- [C2.57] D.-H. Nguyen, **E. Azéma**, **F. Radjai**, and P. Sornay. Compaction of a granular packing of crushable particles. In *23rd ALERT Workshop*, Aussois, France, October 2012.
- [C2.58] D.-H. Nguyen, **E. Azéma**, **F. Radjai**, and P. Sornay. Compaction d'un milieu granulaire à particules sécables. In *13èmes Journées de Matière Condensée (JMC13)*, Montpellier, France, August 2012.
- [C2.59] **F. Radjai**, V. Topin, **F. Dubois**, F. Perales, and Y. Monerie. Modeling submarine avalanches. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2012.
- [C2.60] **F. Radjai**, **J.Y. Delenne**, **E. Azéma**, and S. Roux. Un modèle statistique pour l'évolution de la texture. In *Journées Homogénéisation des Matériaux Granulaires*, Lyon, France, March 2012.
- [C2.61] **M. Delenne**, F. Massi, A. Saulot, and V.-H. Nhu. Numerical dialogue between tribological scales. In *13èmes Journées de la Matière Condensée*, France, August 2012.
- [C2.62] V. Richefeu, **J.Y. Delenne**, and **F. Radjai**. Forces capillaires, coalescence du liquide et régimes de cohésion dans les milieux granulaires non saturés. In *Colloque Modélisation numérique des mélanges fluides-grains*, Montpellier, France, October 2012.
- [C2.63] V. Richefeu, **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and **F. Soulié**. Liquid clustering and capillary cohesion in a granular materials : Lattice Boltzmann modeling. In *13èmes Journées de Matière Condensée (JMC13)*, Montpellier, France, August 2012.

- [C2.64] V. Topin, F. Perales, Y. Monerie, **F. Dubois**, and **F. Radjai**. Un benchmark pour l'étude des milieux granulaires immergées. In *Colloque Modélisation numérique des mélanges fluides-grains*, Montpellier, France, October 2012.
- [C2.65] L. Amarsid, C. Delenne, **J.Y. Delenne**, and **F. Radjai**. Génération des ondes de surface par avalanches immergées. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2013.
- [C2.66] **E. Azéma** and **F. Radjai**. Micro-rhéologie des écoulements granulaires denses. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2013.
- [C2.67] **E. Azéma** and **F. Radjai**. Flow structures of granular flows. In *Colloquium TectonoMechanics 2013*, Paris, France, April 2013.
- [C2.68] **J.Y. Delenne**, **F. Radjai**, and V. Richefeu. Simulation of wetting regimes in a granular material. In *Colloquium TectonoMechanics 2013*, Ecole Normale Supérieure, Paris, France, April 2013.
- [C2.69] P. Mutabaruka, **F. Radjai**, and **J.Y. Delenne**. Déclenchement des avalanches de grains immergés. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2013.
- [C2.70] **S. Nezamabadi**, **F. Radjai**, **J. Averseng**, and **J.Y. Delenne**. A Numerical Strategy for the Compaction of Soft Particle Systems beyond Jamming Transition. In *Dense flows of soft objects : bringing together the cases of bubbles, droplets and cells*, Grenoble, France, May 2013.
- [C2.71] D.-H. Nguyen, **E. Azéma**, **F. Radjai**, and P. Sornay. Modélisation numérique de la compaction des milieux granulaires constitués de grains sécables. In *Conférence Franco-Vietnamienne CIGOS2013 : Construction et Développement*, Lyon, France, April 2013.
- [C2.72] D.-H. Nguyen, **F. Radjai**, **E. Azéma**, and P. Sornay. Compaction d'un milieu granulaire à particules sécables. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2013.
- [C2.73] D.-H. Nguyen, **F. Radjai**, **E. Azéma**, and P. Sornay. Influence de la polydispersité de forme et de taille sur un milieu granulaire. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, June 2013.

Conférences invitées

- [I.1] **F. Radjai**. Particle-scale origins of shear strength in granular media. In *Second Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures*, Tunisia, May 2008.
- [I.2] **F. Radjai**. Force transmission in cohesive granular media. In *Joint IUTAM-ISIMM Symposium on Mathematical Modeling and Physical Instances of Granular Flows (MPGF09)*, Reggio Calabria, Italie, September 2009.
- [I.3] **F. Radjai**. Force and fabric states in granular media. In *Powders and Grains 2009*, Golden, États-Unis, July 2009. AIP, New York.
- [I.4] **F. Radjai**. Microstructure and shear behavior of wet granular media. In *Colloids, Grains and Dense Suspensions : under Flow and under Arrest*, Londres, Royaume-Uni, March 2009.
- [I.5] **J.Y. Delenne**. Discrete element analysis of granular materials. In *Exploratory workshop on soil compaction modelling*, Zurich, Suisse, October 2010.
- [I.6] **J.Y. Delenne**. Modélisation numérique de milieux granulaires humides. In *9e rencontres Dynamique des Systèmes Complexes*, Sautet à Corps, France, September 2010.
- [I.7] **F. Radjai**. Metastable states and stochastic dynamics of granular materials. In *Fifty years of finite freedom dynamics*, Marseille, France, November 2010.
- [I.8] **F. Radjai**. Mechanics and granular materials : theory and simulations. In *Nonsmooth Contact Mechanics : Modeling and Simulations*, Aussois, France, June 2010.
- [I.9] **F. Radjai**. Discrete numerical methods and applications. In *Numerical Modeling of Asteroids as Granular Systems*, Paris, France, January 2010.
- [I.10] **F. Radjai**. Metastable states, micro-instabilities and stochastic dynamics in granular media. In *International Conference on particle-based Methods-Fundamentals and Applications*, Barcelone, Espagne, October 2011.

- [I.11] **F. Radjai**. Discrete modeling of granular systems. In *Systèmes Autogravitants Granulaires*, Nice, France, October 2011.
- [I.12] **F. Radjai**. Granular materials : the grain scale. In *Dynamic wetting of powders : paste and granule formation*, Cavaillon, France, October 2011.
- [I.13] **F. Radjai**. Constitutive behavior and numerical methods for granular materials. In *Discrete Mechanics of Geomaterials*, Grenoble, France, June 2011.
- [I.14] **F. Radjai** and **J.Y. Delenne**. Rhéologie des mélanges grains-fluide par simulations numériques. In *Granulaires immergés et suspensions en écoulement*, Bordeaux, France, November 2011.
- [I.15] **F. Radjai**. Géométrie et dynamique des réseaux de contact dans les milieux granulaires. In *Quatrième Ecole Interdisciplinaire de Rennes sur les Systèmes Complexes*, France, October 2012.
- [I.16] **F. Radjai**. Statistical physics tools for the description of disordered media. In *Multiscale Mechanics of Granular Materials*, Italie, September 2012.
- [I.17] **F. Radjai**. Grain-scale origins of soil strength. In *3rd International conference Soil Bio- and Eco-Engineering : The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*, Vancouver, Canada, July 2012.
- [I.18] **F. Radjai**. Fabric states and plastic behavior of granular materials. In *IUTAM Symposium on mobile particulate systems : rheology, kinematics and complex phenomena*, Bangalore, Inde, January 2012.
- [I.19] **F. Radjai**. Granular plastic flow and fabric-based internal variables. In *ICACM US-France Workshop 2013*, France, May 2013.
- [I.20] **F. Radjai**. Archi-texture d'un empilement de grains. In *Séminaire invité*, Institut d'Alembert, UMPC, Paris, France, March 2013.

Thèses

- [T.1] V. Topin. *Matériaux granulaires cimentés : modélisation et application à l'albumen de blé*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, November 2008.
- [T.2] C. Voivret. *Texture et comportement des matériaux granulaires à grande polydispersité*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, November 2008.
- [T.3] A. Martin. *Écoulement confiné d'un matériau granulaire en interaction avec un gaz, application à la relocalisation du combustible nucléaire*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, February 2010.
- [T.4] J.-P. Gras. *Approche micromécanique de la capillarité dans les milieux granulaires : rétention d'eau et comportement mécanique*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, March 2011.
- [T.5] B. Saint-Cyr. *Modélisation des matériaux granulaires cohésifs à particules non convexes : Application à la compaction des poudres d'UO₂*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, November 2011.
- [T.6] R. Affes. *Relations microstructure-fissuration-perméabilité dans les milieux granulaires cimentés*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2012.
- [T.7] J.C.. Quezada. *Mécanismes de tassement du ballast et sa variabilité*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2012.

Autres publications

- [W.1] **F. Radjai**. Origines géométriques du frottement granulaire, September 2008.
- [W.2] **F. Radjai**. Les invariants et variantes de la transmission des efforts dans les milieux granulaires, June 2008.
- [W.3] **F. Radjai**. Numerical modeling of complex granular materials, July 2009.
- [W.4] **F. Radjai**. Analyse micromécanique du frottement granulaire, January 2009.
- [W.5] **J.Y. Delenne** and **F. Radjai**. Computational Granular Physics, 2010.
- [W.6] **F. Radjai**. Eléments de modélisation réaliste des milieux granulaires, December 2010.
- [W.7] **F. Radjai**. Modélisation numérique discrète des matériaux granulaires, November 2010.
- [W.8] **F. Radjai**. Effects of Granular Composition on the Rheology of Granular Media, August 2010.
- [W.9] **F. Radjai**. Granular side of Montpellier, July 2010.
- [W.10] **F. Radjai**. Dynamique stochastique dans les milieux granulaires, March 2010.
- [W.11] **F. Radjai**. Modélisation avancée des matériaux granulaires, April 2011.
- [W.12] **F. Radjai**. Discrete modeling of granular materials, March 2011.
- [W.13] **F. Radjai**. Comportement des mélanges grains-fluid par simulations numériques, January 2012.
- [W.14] G. Saussine, J. C. Quezada, P. Breul, and **F. Radjai**. Procédé d'évaluation de la compacité d'une couche de ballast de voie ferrée, dispositif de mise en œuvre et méthode de prédiction du tassement de la dite couche de ballast, October 2012.
- [W.15] **F. Radjai**. Granular plastic flow and fabric-based internal variables, June 2013.
- [W.16] **F. Radjai**. Granular texture and quasi-static rheology of granular materials, May 2013.
- [W.17] **F. Radjai**. Texture granulaire et rhéologie des milieux granulaires, January 2013.

7 Thermomécanique des Matériaux (ThM2)

Intervenants : A. Chrysochoos (PR), V. Huon (MCF), H. Louche (PR), J.M. Muracciole (MCF), L. Waltz (MCF), B. Wattrisse (PR), A. Blanche (post-doc), G. Machado (post-doc), S. Wen (post-doc),

Doctorants : S. Vigneron (MRT, 2005-2009), R. Caborgan (MRT, 2008-2011), A. Blanche (ANR, 2009-2012), S. Wen (IRSN, 2009-2012), W. Saber Cherif (IFP, 2010-soutenance prévue en 2013), A. Benarbia (CIFRE Rhodia, 2011-2014), L. Li (MRT, 2011-2014), T. Madani (IRSN, 2012-2015).

Présentation de l'équipe

Au 30 juin 2013, l'équipe ThM2 est constituée de 6 membres permanents (3 PU + 3 MCF) et 7 membres non-permanents (4 étudiants en thèse et 3 étudiants en stage post-doctoral). L'effectif moyen de l'équipe est resté sensiblement stable sur la période. Le nombre de permanents est resté constant, mais il a été renouvelé du tiers sur 3 ans (recrutement d'un MCF suite à une promotion MCF/PU et recrutement d'un PU suite à une mutation). Les membres de l'équipe accueillent aussi en moyenne 8 stagiaires de courte durée par an qui se répartissent entre les projets de fin d'étude d'ingénieur (5 mois), les stages de niveau M1 (3 mois) et les stages de niveau M2 (5 mois).

L'équipe dispose de moyens d'essais mécaniques classiques : trois machines d'essais uni-axiales (2 électromécaniques et 1 hydraulique, capacité de 25 à 100 kN). Elle s'est dotée depuis de nombreuses années de différents matériels d'imagerie : elle possède maintenant 2 caméras infrarouges « de mesure », une caméra infrarouge « d'imagerie » et 6 caméras « visibles » (1 rapide, 1 haute résolution, et 4 « standard ») ainsi que de nombreuses optiques permettant de s'adapter aux différentes échelles abordées dans nos travaux. Nous avons acquis les moyens d'étalonnage nécessaires à la réalisation de mesures infrarouges fines (2 corps noirs étendus plans couvrant la gamme 0° C-600° C). Nous avons investi ces dernières années dans des moyens de préparation d'échantillons (four de traitement thermique, tronçonneuse, bancs de polissage, ...). Nous avons aussi mis en place, avec le Service d'Expérimentation du laboratoire, des dispositifs spécifiques originaux permettant la synchronisation de l'acquisition d'images et la numérisation de données analogiques issues de différents capteurs (gamme de fréquence : 0.01 Hz-1 MHz).

Les sources de financement de l'équipe proviennent des dotations institutionnelles récurrentes et de différents contrats provenant de l'ANR (projets QIRD-THS, DISFAT et ANiM), ou passés avec différents industriels (IRSN, Rhodia, IFP, CEA, CERMA, ...).

Les membres de l'équipe ThermoMécanique des Matériaux développent de nombreuses interactions avec leur environnement régional, national et international.

Au niveau régional, l'équipe contribue fortement au fonctionnement du Grand Plateau Technique Régional « Mécanique et Génie Civil » (GPTR GMC) : élaboration des réponses aux industriels, réalisation des prestations, rédaction de rapports d'étude. Le responsable de l'équipe ThM2 est actuellement le responsable du GPTR_MGC.

Approche adoptée

Nous avons développé ces dernières années des collaborations académiques avec les universités de Calabre, de Columbia, l'Ecole Centrale de Nantes, l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et

d’Aérotechnique de Poitiers, l’Université Joseph Fourier), ainsi que des collaborations contractuelles et/ou industrielles (IRSN, Rhodia, IFPEN, CERMA, CEA, EdF, ...). Ces différentes collaborations nous ont amenées à accueillir un nombre important de collègues (6 étudiants en thèses, 1 post-doctorants, 3 chercheurs).

Par ailleurs, les membres de l’équipe maintiennent une activité « d’expertise » importante : relecture dans des revues internationales à comité de lecture ou fonction d’éditeur associé (domaines de la mécanique, de l’expérimentation, des matériaux), participation aux structures d’évaluation régionales (transfert LR) et nationales (ANRT, ADEME, AERES, CoNRS), et à de nombreux jurys de thèse/HDR.

Pour terminer, les membres de l’équipe sont depuis toujours particulièrement impliqués dans des opérations de partage/diffusion/transfert de la connaissance :

- animation de 2 groupes de travail puis du GDR2519 « Mesures de Champs et Identification en Mécanique des Solides »
- organisation de manifestations scientifiques (sessions de congrès : PhotoMechanics 2008, JMC12, PhotoMechanics 2011, ICEM14, CFM2011, CFM2013 ; conférence PhotoMechanics 2013),
- participation/organisation d’écoles thématiques CNRS sur l’identification de sources de chaleur (Clermont-Ferrand en 2009, Cachan en 2011, et Montpellier en 2013),
- mise en place et animation de formations au niveau M2 à travers les responsabilités des membres de l’équipe : dans les filières ingénieurs (M&I et Matériaux de Polytech’Montpellier), dans les formations de L et de M à la Faculté des Sciences, dans la mise en place d’un cursus de Master d’Ingénierie CMI) et dans la mise en place d’un module doctoral international « Multi-scale modelling for multi-physical couplings » avec Jolanta Lewandowska de l’équipe CGB.

Les contours thématiques de l’équipe sont détaillés dans la section 1.

Activités de l’équipe

D’un point de vue général, les activités de recherche de l’équipe ThM2 sont relatives à l’étude des lois de comportement des Matériaux Solides. Les principales spécificités de notre approche, qui seront détaillées dans les paragraphes suivants, résultent des choix retenus : (i) pour décrire le comportement de la matière (vue comme un système thermodynamique dont les évolutions doivent respecter les principes de la Thermodynamique), (ii) pour observer son évolution (développement de techniques d’imagerie pour tenir compte des effets de structure) et (iii) pour aborder une large gamme de matériaux (métaux/polymères/céramiques) et de comportements (thermo-élasticité/changement de phase/visco-élasticité/plasticité/endommagement/fatigue).

1 Approche adoptée

Notre approche a pour but d’observer puis d’analyser le comportement thermomécanique des matériaux solides afin de proposer des modèles de comportement « thermo-mécaniquement cohérents » (i.e. respectant la manière dont le matériau transforme l’énergie qui lui est fournie lors d’une sollicitation qu’elle soit mécanique, thermique, ou autre). Elle nous conduit à analyser la réponse énergétique de la matière aux échelles retenues en s’affranchissant, dans la mesure du possible, des effets d’échelle et de de structure. Ces observations sont obtenues via des dispositifs expérimentaux originaux développés afin d’accéder au bilan énergétique associé à un chargement donné. Nous avons la volonté d’appliquer cette démarche à l’étude des grandes classes de matériaux et de comportements afin d’améliorer la capacité prédictive des modèles.

Cette approche nous amène à aborder des questions fondamentales en Mécanique des Matériaux, comme par exemple, la détermination du contenu énergétique d’une boucle d’hystérésis, la distinction des effets du temps (provoqués par la viscosité ou des couplages thermo-mécaniques), l’équivalence « temps-température » dans les polymères, la description de l’énergie bloquée en plasticité, ... ; tout en développant des collaborations industrielles fortes sur des applications spécifiques (fatigue, endommagement, ...).

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons rapidement nos activités en adoptant le plan suivant : (i) description des outils développés pour l'observation des mécanismes de déformation, (ii) analyse du comportement ThermoMécanique de la matière et (iii) présentation des nouveaux champs d'investigation. Les points (i) et (ii) constituent la continuité des thématiques abordées depuis plus d'une vingtaine d'années dans l'équipe et le point (iii) illustre les ouvertures réalisées sur la période.

2 Moyens et méthodes

Imagerie

L'équipe possède un solide savoir-faire en matière d'imagerie (corrélation d'images numériques et thermographie infrarouge). Sur la dernière période, nous avons mis en place une collaboration avec F. Latourte (EdF) visant à mettre en place un outil logiciel « multi-plateformes » regroupant les principaux traitements d'images développés au sein de l'équipe. Pour l'instant cet outil est limité aux seuls algorithmes de corrélation d'images numériques, et il est utilisé à EdF et à l'IRSN. L'équipe s'est dotée depuis 2 ans d'un outil commercial performant de stéréo-corrélation (Vic3D) afin de mieux décrire les écoulements et notamment les variations de volumes. Pour pouvoir caractériser les performances métrologiques de ce dispositif, nous avons mis en place un outil générique de simulation d'images de stéréo-corrélation. Cet outil original a été mis à disposition de la communauté nationale et internationale (dans le cadre d'un benchmark du GT1 du GDR2519 piloté par L. Sabatier, et du projet DIC Challenge piloté par P. Reu de Sandia National Laboratories), et il est utilisé actuellement pour comparer les performances des différents logiciels (académiques/commerciaux) présents sur le marché. De plus, nous avons développé, dans le cadre de la thèse de Shuang Wen, un post-traitement spécifique permettant d'accéder au tenseur complet de déformation moyen sur des échantillons minces. Cette étape est essentielle pour accéder, avec un nombre restreint d'hypothèses, aux variations de volumes imputables, par exemple, à l'endommagement.

Bilans d'énergie

Une activité importante de l'équipe est relative à la détermination des champs de source de chaleur accompagnant la déformation des matériaux. Sur ce thème, l'équipe ThM2 a été porteuse de l'ANR QIRD THS regroupant des spécialistes (i) de la métrologie dans le domaine infrarouge (GRESPI, Reims), (ii) des méthodes non destructives liées à la caractérisation des matériaux (TREFLE ENSAM Bordeaux) et (iii) de méthodes inverses (LMS, Ecole Polytechnique Palaiseau). Les travaux issus de cette ANR ont permis (i) d'améliorer la caractérisation métrologique des caméras matricielles, (ii) de proposer des moyens de caractérisation des évolutions locales de champs de certains paramètres thermo-physiques présents dans l'équation de diffusion de la chaleur, et (iii) de proposer des méthodes permettant d'estimer, à partir de l'équation de diffusion, les sources de chaleur qui accompagnent la déformation des matériaux (méthodes directes ou inverses). Ces travaux ont été largement diffusés dans la communauté au travers du GT2 du GDR2519, co-animé initialement par André Chrysochoos et Hervé Pron.

De manière plus spécifique, nous avons proposé des méthodes d'estimation de sources de chaleur adaptées au cas de la fatigue gigacyclique (prise en compte du contenu spectral des sources et de conditions aux limites non symétriques) et de la plasticité des multi-cristaux (adaptation du calcul des sources à la microstructure). Les méthodes d'identification de sources de chaleur sont souvent limitées par le bruit qui entache les mesures thermiques. Une méthode de filtrage par projection dans une base modale, inspirée de l'analyse vibratoire, a été proposée dans le cas de plaques minces et donne d'ores et déjà des résultats très prometteurs (travail mené en collaboration avec le laboratoire SYMME de l'Université de Savoie et soumis à Int. J. Eng. Sc.). Des méthodes originales de caractérisation de constantes thermo-physiques (chaleur spécifique, diffusivité thermique) ont aussi été proposées dans le cadre de la thèse de V. Delobelle (co encadrement laboratoire 3S-R Grenoble et LMGC). Ces méthodes ont été validées sur des chaleurs mises en jeux pendant les transformations de phase induites thermiquement dans des un AMF de type NiTi à l'aide de mesures obtenues par des méthodes alternatives (DSC, $3 - \omega$, flash), et ce dans le cadre de plusieurs collaborations (IES de Montpellier

et TREFLE de Bordeaux).

Enfin, nous avons étendu, dans la thèse de Shuang Wen et en collaboration avec l'IRSN dans le cadre du laboratoire MIST, la procédure d'identification de modèles de zones cohésives proposée dans le cadre du post-doctorat de Vincent Richefeu en relâchant certaines hypothèses fortes et en caractérisant la longueur à introduire pour accéder au saut de déplacement. Ce travail est étendu au cas de la fissuration sous chargements complexes dans la thèse de Tarik Madani.

3 Thermomécanique et Matériaux

Fatigue

Durant le précédent quadriennal, les travaux sur la fatigue des métaux se sont poursuivis et ont été étendus à la fatigue dynamique à très grand nombre de cycles (VHCF) dans le cadre de la thèse d'Antoine Blanche. Cette thèse s'intégrait dans un projet ANR regroupant 4 laboratoires (PIMM, LMGC, LEME et LPMTM) et le CETIM. Notre contribution à ce projet a d'abord été de développer une technique de mesure par pyrométrie spécifique à la fatigue dynamique à très grand nombre de cycles afin d'accéder à l'énergie dissipée en moyenne sur chaque cycle. Le bilan d'énergie construit à partir de cette mesure montre que toute l'énergie mécanique perdue dans un cycle ne se transforme pas en chaleur et que ce bilan évolue au cours de la durée de vie du matériau. Ces résultats fondamentaux sont donc en désaccord avec la notion de comportement cyclique stabilisé (accommodation élastique et/ou adaptation plastique) largement utilisée dans les critères de durée de vie, et constituent les données de base des modélisations thermo-mécaniques en cours d'élaboration.

L'objectif du projet FUI-EUREKA DURAFIP, débuté en 2011 et porté par Rhodia et regroupant de nombreux partenaires industriels (Trelleborg, e-Xtream, Filtrauto, PSA) et académiques (LMGC, ENSTA Bretagne, ENSAM Paris et Bordeaux, CEMEF), est de promouvoir les composites polyamides au rang de matériau de structure pour l'industrie du transport. Notre contribution à ce projet se concentre sur l'analyse énergétique du comportement thermomécanique en fatigue du PA6.6 chargé de fibres de verre au travers de la thèse d'Adil Benaarbia. L'objectif principal est ici de construire expérimentalement des bilans locaux d'énergie, comprenant notamment l'estimation des champs de sources dissipatives et de couplage pour différentes orientations de fibres et différents teneurs en eau. Ces informations énergétiques seront partagées avec les partenaires ayant en charge de développer des modélisations du comportement dans un cadre thermomécanique. Parmi les hypothèses fondamentales auxquelles font appel certaines modélisations, une attention toute particulière sera accordée à la règle d'équivalence « temps (fréquence)-température », d'un intérêt industriel évident dès que l'on veut accéder rapidement à des propriétés de résistance à long terme du matériau. L'objectif sur le plan théorique sera ici d'arriver à relier cette règle d'équivalence aux mécanismes d'auto-échauffement induits par le chargement (effet dissipatif) et aux effets de couplage thermo-hygromécanique (influence de la température et de l'humidité sur le comportement mécanique).

Nous avons entamé en 2011 une collaboration avec Sylvie Castagnet de l'Institut PPrime portant sur l'établissement d'un critère de fatigue fondé sur une approche énergétique (e.g. thermomécanique) du comportement de thermoplastiques. Nous nous proposons, ici, d'étudier l'évolution, au cours des cycles, de la signature énergétique d'une boucle d'hystérésis, souvent considérée comme étant intégralement dissipée. Nous travaillons, dans un premier temps, sur un PEHD commercial non chargé et sur des boucles « stabilisées » obtenues en traction ou en cisaillement, afin de limiter le nombre de paramètres à prendre en compte dans la modélisation du comportement. L'objectif est de rendre le modèle de comportement proposé compatible avec les caractéristiques énergétiques de la boucle d'hystérésis.

Elastomères

Le caractère couplé (« thermo-mécanique ») du comportement du caoutchouc est connu de très longue date. La littérature mentionne dès le milieu du 19^{ème} siècle l'existence dans ces matériaux de mécanismes de couplages aux effets antagonistes. Le mécanisme le plus couramment observé est associé au « débobinage » des pelotes de macromolécules, et il est classiquement mis en équation dans

le cadre de la théorie « statistique » de l'élasticité caoutchoutique qui aboutit au concept de l'élasticité entropique. Le second mécanisme correspond à la thermo-élasticité classique. Les observations expérimentales issues de la bibliographie montrent depuis très longtemps une transition, matérialisée par un « point d'inversion », entre un régime de « thermo-élasticité » et un régime d'« élasticité caoutchoutique ».

Les travaux menés dans l'équipe sur ce thème depuis une dizaine d'années proposent de revenir sur le cadre de modélisation généralement retenu pour rendre compte de cette inversion (celui de l'élasticité) et de l'enrichir en y introduisant une variable d'état supplémentaire associée à la déformation caoutchoutique. L'inversion thermoélastique est ainsi vue comme le résultat de la compétition entre deux mécanismes de couplage thermomécanique.

Les travaux de thèse de Rodica Caborgan abordent un domaine de contraintes/déformations largement supérieures à l'inversion thermoélastique. Les observations montrent qu'aucune puissance dissipée notable n'est détectée, y compris en augmentant significativement la fréquence, mais qu'un second mécanisme de couplage, insensible à l'histoire du cyclage, apparaît. La phénoménologie observée ici sous l'angle de la calorimétrie est ainsi cohérente avec le processus de cristallisation/fusion sous contrainte rapporté dans la littérature via des mesures cristallographiques.

Plasticité cristalline

L'essor des moyens informatiques de ces dernières décennies a permis le développement et l'implémentation dans des codes de calcul de modèles de comportement de plus en plus « réalistes », mais aussi de plus en plus complexes. Bien que souvent écrits dans un cadre thermodynamique, leur « robustesse thermomécanique », associée à la cohérence entre les différentes énergies mises en jeu pendant la déformation (énergies de déformation, stockée, de couplage ou dissipées), est très rarement vérifiée. La thèse de L. Li débutée en 2011, aborde le cas des modèles de plasticité cristalline, éventuellement couplés avec l'endommagement développés pour rendre compte de la déformation à l'échelle du grain. Ce travail est effectué en collaboration avec L. Stainier (GeM) et F. Latourte (EdF). L'accent a été mis, dans un premier temps, sur le développement de traitements d'images spécifiques intégrant les caractéristiques de la microstructure. L'objectif est maintenant d'interpréter les informations expérimentales pour construire le bilan d'énergie à cette échelle et le comparer aux prédictions de modèles classiques de la littérature (Meric-Cailletaud, Stainier-Cutiño-Ortiz).

4 Nouveaux périmètres

Thermo-Mécanique et Santé

Durant la période écoulée et dans l'esprit des restructurations du pôle montpelliérain (labex NUMEV, pôle EuroMov, fusion des universités de Montpellier 1 et 2, ...), l'équipe ThM2 a cherché à développer ses interactions avec les problématiques de la santé.

Le premier thème, abordé en collaboration avec Franck Jourdan de l'équipe CGB, a été relatif à l'étude des brûlures superficielles de l'épiderme et a fait l'objet de la thèse de Domoina Ratovoson. Le travail expérimental et numérique a permis de proposer un modèle couplé (transfert de chaleur et endommagement thermique) du comportement de tissus humains (veines et peau). Ce modèle a pour but de simuler la dégradation de la peau suite à une brûlure et de tester l'efficacité de différents traitements thermiques visant à limiter les lésions.

Le second thème est relatif à la caractérisation du procédé de « Steam Vein Sclerosis ». Trois projets de collaboration ont été réalisés avec la société CERMA (Archamps, 74). Cette entreprise développe des produits basés sur l'injection de vapeur dans des tissus avec des applications en oncologie et en phlébologie. Les projets étudiants, menés dans différents cadres (stages de Master/Ingénieur, projet de fin d'études) ont porté sur l'étude thermique du système SVS à partir d'expérimentations ou de modélisations. Ce type de collaboration devrait se poursuivre au cours des prochaines années.

Procédés

L'ouverture des thématiques de recherche de l'équipe ThM2 vers les procédés de fabrication s'est intensifiée au cours du dernier quadriennal. Nous nous sommes, ainsi, intéressés à la compréhension des mécanismes de fatigue de composants électroniques de puissance (collaboration avec F. Forest de l'IES dans le cadre de la thèse de Vanessa Smet), et à l'utilisation de laser à fibre pour la mise en œuvre de capteurs acoustiques sous-marins (collaboration avec B. Orsal de l'IES dans le cadre de la thèse de Tahar Souici).

Cette ouverture a été accentuée par le recrutement d'un enseignant chercheur (L. Waltz) en 2010, et a conduit à la mise en place d'une collaboration avec l'Institut Charles Delaunay de l'Université de Technologie de Troyes. Cette collaboration porte sur (i) l'étude de l'effet de la nanocristallisation superficielle sur l'alliage NiTi, (ii) l'amélioration des propriétés de fatigue et d'usure de l'acier inoxydable 316L sous l'effet combiné du traitement de nanocristallisation superficielle et de la nitruration à basse température (projet CPER NANOSURF), et (iii) l'identification de lois constitutives sur matériaux à gradient de propriétés. Ce dernier point s'effectue aussi dans le cadre des activités du laboratoire MIST.

Matériaux architecturés

Le LMGC est l'un des partenaires de l'ANR blanche ANiM (Architected Nitinol Materials) qui a débuté en décembre 2010. Portée par le laboratoire 3S-R de Grenoble (D. Favier, L. Orgéas et G. Chagnon), cette ANR réunit également SIMAP (D. Bouvard et D. Rodney), le LIMATB (G. Rio), le LARMAUR (J.B. Le Cam (Lami Clermont Fd) et l'University of Western Australia (Y. Liu). L'objectif de la tâche confiée à l'équipe ThM2 est de concevoir et d'étudier des matériaux architecturés construits par assemblages de tubes en alliage à mémoire de forme NiTi. Après une caractérisation du matériau à partir d'essais de traction à différentes températures et du comportement en compression diamétrale d'un seul tube, des empilements de base (3 tubes en cellule triangulaire ou 4 tubes en cellule carrée) ont été fabriqués puis testés en compression diamétrale. Une modélisation éléments finis de ces structures et de structures contenant plusieurs cellules est actuellement en cours. Ces travaux sont réalisés principalement dans le cadre du post-doctorat de Guilherme Machado débuté en décembre 2011, pour une durée de 2 ans.

Nouveaux champs d'application de ThM2

Stockage du CO₂ : La collaboration entamée il y a 2 ans avec l'IFPEN a pour cadre la thèse CIFRE de Walid Saber-Cherif qui a pour but le développement d'un modèle numérique pour l'analyse des écoulements multiphasiques (eau liquide/vapeur et CO₂) dans une formation géologique profonde poreuse, déformable et progressivement endommageable par l'injection de CO₂. L'écoulement multiphasique dans le milieu, et à travers les fissures, est décrit par une loi de Darcy généralisée. Les équations gouvernant le couplage avec le squelette solide, incluant les fissures, sont exprimées dans le cadre de la théorie généralisée de Biot. L'implémentation numérique repose sur la méthode des éléments finis pour discrétiser la forme faible des équations gouvernantes, et sur l'adaptation d'un modèle de zone cohésive pour simuler l'apparition de fissures.

Comportement du manteau terrestre : Benjamin Holtzman est assistant research professor au Lamont Doherty Earth Observatory de Columbia University à New York. Il travaille depuis près de 2 ans en collaboration avec A.Chrysochoos (ThM2) et L. Daridon (M3) à la mise en place de modèles de comportement de roches du manteau terrestre à haute température. La maîtrise du comportement de ces roches est importante pour la compréhension des mouvements du manteau terrestre et l'extraction du magma qui constitue la source des volcans. L'équipe ThM2 joue dans cette collaboration le rôle d'expert en modélisation du comportement thermomécanique. L'objectif principal est de regrouper les nombreuses données existantes dans la littérature et relatives à la déformation des milieux géologiques ainsi que les modèles phénoménologiques qui leur sont associés et de tenter d'en faire une synthèse utilisant le cadre des matériaux standard généralisés. Durant ces 18 derniers mois, Benjamin Holtzman a effectué 3 séjours de 2 à 3 semaines au LMGC. Un article est en cours de finalisation. L'approche ainsi que les premiers résultats de simulation ont été présentés dans une rencontre internationale.

Mécanismes de couplages dans les ouvrages du patrimoine : Certaines pierres calcaires exposées aux pluies et aux ruissellements développent de spectaculaires dégradations qui affectent le matériau sur plusieurs centimètres d'épaisseur, voire à cœur. Les variations de dimension en fonction de la teneur en eau et de la température semblent jouer un rôle décisif dans le processus de dégradation superficielle qui affecte les pierres calcaires. Les cycles hydriques (humidification/séchage) peuvent générer un endommagement et conduire à la fissuration. L'objectif est ici d'étudier ces phénomènes en concentrant le travail sur deux pierres à forte dilatation hydrique. Ce projet de recherche est mené en collaboration avec le CIRCP de Marseille, dont l'objectif est de développer des méthodes et outils pour la restauration et la conservation du patrimoine.

Bibliographie

Articles dans des revues

- [A.1] **P. Alart** and **D. Dureisseix**. A scalable multiscale LATIN method adapted to nonsmooth discrete media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197 :319–331, 2008. **.
- [A.2] **E. Azéma**, **F. Radjai**, R. Peyroux, V. Richefeu, and G. Saussine. Short-time dynamics of a packing of polyhedral grains under horizontal vibrations. *European Physical Journal E*, 26 :327–335, 2008. **.
- [A.3] B. Berthel, **A. Chrysochoos**, **B. Wattrisse**, and A. Galtier. Infrared image processing for the calorimetric analysis of fatigue phenomena. *Experimental Mechanics*, 48 :79–90, 2008.
- [A.4] **A. Chrysochoos**, B. Berthel, F. Latourte, A. Galtier, **S. Pagano**, and **B. Wattrisse**. Local energy analysis of high-cycle fatigue using digital image correlation and infrared thermography. *Journal of Strain Analysis*, 43 :411–421, 2008. **.
- [A.5] **A. Chrysochoos**, B. Berthel, F. Latourte, **S. Pagano**, **B. Wattrisse**, and B. Weber. Local energy approach to steel fatigue. *Strain*, 44 :327–334, 2008. **.
- [A.6] **D. Dureisseix**. Two examples of partitioning approaches for multiscale and multiphysics coupled problems. *European Journal of Computational Mechanics*, 17 :807–818, 2008.
- [A.7] **D. Dureisseix** and D. Néron. A multiscale computational approach with field transfer dedicated to coupled problems. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 6 :233–250, 2008.
- [A.8] F. Latourte, **A. Chrysochoos**, **S. Pagano**, and **B. Wattrisse**. Elastoplastic behavior identification for heterogeneous loadings and materials. *Experimental Mechanics*, 48 :435–449, 2008. **.
- [A.9] F. Latourte, A. Samida, **A. Chrysochoos**, **S. Pagano**, and **B. Wattrisse**. An inverse method applied to the determination of deformation energy distributions in the presence of pre-hardening stresses. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 43 :705–717, 2008. **.
- [A.10] E. Malachanne, **D. Dureisseix**, **P. Cañadas**, and **F. Jourdan**. Experimental and numerical identification of cortical bone permeability. *Journal of Biomechanics*, 41 :721–725, 2008. **.
- [A.11] A. Mobasher Amini, **D. Dureisseix**, P. Cartraud, and N. Buannic. A Domain Decomposition Method for problems with structural heterogeneities on the interface : Application to a passenger ship. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198 :Pages 3452–3463, 2008.
- [A.12] **J.M. Muracciolo**, **B. Wattrisse**, and **A. Chrysochoos**. Energy Balance of a Semicrystalline Polymer During Local Plastic Deformation. *Strain*, 44 :468–474, 2008.
- [A.13] D. Néron and **D. Dureisseix**. A computational strategy for poroelastic problems with a time interface between coupled physics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 73 :783–804, 2008.
- [A.14] N. Ouadoudi, O. Oussouaddi, **L. Daridon**, S. Ahzi, and **A. Chrysochoos**. Influence of dissipated energy on adiabatic shear band spacing : influence de l'énergie dissipée sur la formation

des bandes de cisaillement adiabatique multiples. *Physical and Chemical News*, 39 :75–81, 2008.

**.

- [A.15] F. Perales, S. Bourgeois, **A. Chrysochoos**, and Y. Monerie. Two field multibody method for periodic homogenization in fracture mechanics of nonlinear heterogeneous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 75 :3378–3398, 2008.
- [A.16] F. Pérales, S. Bourgeois, **A. Chrysochoos**, and Y. Monerie. Two fields multibody method for periodic homogenization in fracture dynamics of non linear composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 75 :3378–3398, 2008.
- [A.17] G. Sierra, **B. Wattrisse**, and **C. Bordreuil**. Structural analysis of steel to aluminum welded overlap joint by digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 48 :213–223, 2008. **.
- [A.18] M. Bornert, F. Brémand, P. Doumalin, J.-C. Dupré, M. Fazzini, M. Grédiac, F. Hild, S. Mistou, J. Molimard, J.-J. Orteu, L. ROBERT, Y. Surrel, P. Vacher, and **B. Wattrisse**. Assessment of Digital Image Correlation measurement errors : Methodology and results. *Experimental Mechanics*, 49 :353–370, 2009.
- [A.19] **A. Chrysochoos**, **B. Wattrisse**, J. M. Muracciole, and **Y. El Kaïm**. Fields of stored energy associated with localized necking of steel. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 4 :245–262, 2009.
- [A.20] S. Giancane, **A. Chrysochoos**, V. Dattoma, and **B. Wattrisse**. Deformation and dissipated energies for high cycle fatigue of 2024-T3 aluminium alloy. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 52 :117–121, 2009.
- [A.21] **V. Huon**, **B. Cousin**, **O. Maisonneuve**, and **B. Wattrisse**. Investigating the thermo-mechanical behaviour of cementitious materials using image processing techniques. *Cement and Concrete Research*, 39 :529–536, 2009.
- [A.22] A. Mobasher Amini, **D. Dureisseix**, and P. Cartraud. Multi-scale domain decomposition method for large scale structural analysis with a zooming technique : Application to plate assembly. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79 :417–443, 2009.
- [A.23] **A. Chrysochoos**, **V. Huon**, **F. Jourdan**, **J.M. Muracciole**, R. Peyroux, and **B. Wattrisse**. Use of Full-Field DIC & IRT Measurements for the Thermomechanical Analysis of Material Behavior. *Strain*, 46 :117–130, 2010. **.
- [A.24] **L. Daridon**, **B. Wattrisse**, **A. Chrysochoos**, and M. Potier-Ferry. Solving fracture problems using an asymptotic numerical method. *Computers and Structures*, 89 :476–484, 2011. **.
- [A.25] **D. Dureisseix** and B. Marcon. A partitioning strategy for the coupled hygromechanical analysis with application to wood structures of Cultural Heritage. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 88 :228–256, 2011.
- [A.26] V. Grolleau, **H. Louche**, V. Delobelle, A. Penin, G. Rio, L. Yinong, and D. Favier. Assessment of tension-compression asymmetry of NiTi using circular bulge testing of thin plates. *Scripta Materialia*, 65 :347–350, 2011.
- [A.27] O. Oussouaddi, **L. Daridon**, S. Ahzi, and **A. Chrysochoos**. Influence of Dissipated Energy on Shear Band Spacing in HY100 Steel. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 133 :Voir DOI, 2011. **.
- [A.28] M. Poncelet, J.-F. Witz, H. Pron, and **B. Wattrisse**. A study of IRFPA camera measurement errors : radiometric artefacts. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 8 :165–186, 2011.
- [A.29] T. Pottier, F. Toussaint, P. Vacher, **H. Louche**, and T. Coudert. Out-of-plane testing procedure for inverse identification purpose : application in sheet metal plasticity. *Experimental Mechanics*, page ..., 2011.
- [A.30] D. Reirant, Z. Quadir, W. Xu, **L. Waltz**, and M. Ferry. Microstructural Investigation of Co-rolled Nanocrystalline Stainless Steel Sheets. *Materials Science Forum*, 702-703 :127–130, 2011.

- [A.31] **P. Alart**, D. Iceta, and **D. Dureisseix**. A nonlinear Domain Decomposition formulation with application to granular dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 205-208 :59–67, 2012. **.
- [A.32] **A. Chrysochoos**. Thermomechanical Analysis of the Cyclic Behavior of Materials. *Procedia IUTAM 4*, pages 15–26, 2012.
- [A.33] **A. Chrysochoos**. Infrared thermography applied to the analysis of material behavior : a brief overview. *Quantitative InfraRed Thermography*, 9 :193–208, 2012.
- [A.34] **H. Louche**, P. Schlosser, D. Favier, and L. Orgéas. Heat Source Processing for Localized Deformation With Non-Constant Thermal Conductivity. Application to Superelastic Tensile Tests of NiTi Shape Memory Alloys. *Experimental Mechanics*, 52 :1313–1328, 2012.
- [A.35] J. Petit, **L. Waltz**, G. Montay, D. Reintant, A. Roos, and M. Francois. Multilayer Modelling of Stainless Steel with Nanocrystallized Superficial Layer. *Materials Science and Engineering : A*, 536 :124–128, 2012.
- [A.36] T. Pottier, F. Toussaint, **H. Louche**, and P. Vacher. Inelastic heat fraction estimation from two successive mechanical and thermal analyses and full-field measurements. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 38 :1–11, 2012.
- [A.37] V. Richefeu, **A. Chrysochoos**, **V. Huon**, Y. Monerie, R. Peyroux, and **B. Wattrisse**. Towards local identification of cohesive zone models using digital image correlation. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 34 :38–51, 2012.
- [A.38] M. Chemkhi, D. Reintant, A. Roos, C. Garnier, **L. Waltz**, C. Demangel, and G. Proust. The effect of surface mechanical attrition treatment on low temperature plasma nitriding of an austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 221 :191–195, 2013.
- [A.39] D. Ratovoson, **F. Jourdan**, and **V. Huon**. A 3D finite element model for hyperthermia injury of blood-perfused skin. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, page Voir DOI, 2013. **.
- [A.40] D. Ratovoson, **F. Jourdan**, and **V. Huon**. Influence of gravity on the skin thermal behavior : experimental study using dynamic infrared thermography. *Skin Research and Technology*, 19 :397–408, 2013. **.
- [A.41] C. Wang, A. Blanche, D. Wagner, **A. Chrysochoos**, and C. Bathias. Dissipative and microstructural effects associated with fatigue crack initiation on an Armco iron. *International Journal of Fatigue*, page Voir DOI, 2013.

Participations à un ouvrage

- [B.1] J.-C. Batsale, **A. Chrysochoos**, H. Pron, and **B. Wattrisse**. Analyse thermographique du comportement des matériaux. In *Mesures de champs et identification en mécanique des solides*, pages 467–496. Hermes, 2011.
- [B.2] **A. Chrysochoos** and Y. Surrel. Éléments de base de métrologie et introduction aux différentes techniques. In *Mesures de champs et identification en mécanique des solides*, pages 27–54. Hermes, 2011.
- [B.3] J.-C. Batsale, **A. Chrysochoos**, H. Pron, and **B. Wattrisse**. Thermographic analysis of materials behaviour. In *Full-field Measurements and Identification in Solid Mechanics*, pages 439–467. Wiley, 2013.

Communications avec actes dans des colloques

- [C1.1] B. Berthel, F. Latourte, **S. Pagano**, **B. Wattrisse**, and **A. Chrysochoos**. Fields of dissipated and stored energy accompanying the hcf of steels. In *Photomechanics 2008*, page CDrom 26p, Loughborough, Royaume-Uni, 2008.
- [C1.2] A. Mobasher Amini, **D. Dureisseix**, P. Cartraud, and N. Buannic. Multi-scale domain decomposition method for large structural analysis. In *Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mechanical Engineering*, page 7 p. on CDROM, Kerman, Iran, République Islamique D', 2008.
- [C1.3] B. Orsal, P. Faye, N., K. Hey Tow, R. Vacher, and D. Dureisseix. Optical noise of a 1550 nm fiber laser as an underwater acoustic sensor. In *Proceedings of the 5th International Conference on Unsolved Problems on Noise and Fluctuations in Physics, Biology & High Technology*, pages 1–4, Lyon, France, 2008.
- [C1.4] R. Caborgan, **J.M. Muracciole**, **B. Wattrisse**, **L. Sabatier**, and **A. Chrysochoos**. Energy analysis for the cyclic behavior of rubber-like materials using thermomechanical full-field measurements. In *ESMC 2009*, pages Cd–Rom, Lisbonne, Portugal, 2009.
- [C1.5] D. Iceta, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Comparaison de méthodes de décomposition de domaine multiéchelles en dynamique granulaire. In *Actes du 9e Colloque National en Calcul des Structures*, volume 1, pages 161–166, Giens, France, 2009.
- [C1.6] F. Latourte, **A. Chrysochoos**, B. Berthel, A. Galtier, **S. Pagano**, and **B. Wattrisse**. Local energy analysis of HCF fatigue using DIC & IRT. In *Proceedings SEM 2009*, pages Cd–Rom, Albuquerque, États-Unis, 2009.
- [C1.7] E. Malachanne, **D. Dureisseix**, and **F. Jourdan**. Numerical model of bone remodeling taking into account fluid phasis. In *Proceedings of the 1st International Conference on Tissue Engineering*, page 8 pages, Leira, Portugal, 2009.
- [C1.8] B. Orsal, K. Hey Tow, R. Vacher, and **D. Dureisseix**. Optical noise of a 1550 nm fiber laser as an underwater acoustic sensor. In *Noise and Fluctuations*, volume 1129, pages 379–386, Pisa, Italie, 2009.
- [C1.9] J.-C. Dupré, M. Bornert, L. ROBERT, and **B. Wattrisse**. Digital image correlation : displacement accuracy estimation. In *ICEM14*, pages Cd–Rom, Poitiers, France, 2010.
- [C1.10] **V. Huon**, V. Richefeu, S. Wen, **A. Chrysochoos**, Y. Monerie, and **B. Wattrisse**. Experimental characterization of a cohesive zone model using Digital Image Correlation. In *ICEM14*, pages Cd–Rom, Poitiers, France, 2010.
- [C1.11] B. Marcon, **D. Dureisseix**, P. Dionisi-Vici, **J. Gril**, and L. Uzielli. Experimental and numerical mechanical study of a framing technique for cupping control of painted panels combining crossbars and springs. In *Proceedings of the International Conference on Wood Science for Preservation of Cultural Heritage : Mechanical and Biological Factors*, pages 219–224, Braga, Portugal, 2010.
- [C1.12] D. Ratovoson, **F. Jourdan**, and **V. Huon**. A study of heat distribution in human skin : use of Infrared Thermography. In *EPJ Web of Conferences*, pages 1–8, France, 2010.
- [C1.13] A. Blanche, **A. Chrysochoos**, **B. Wattrisse**, and B. Berthel. Comportement dissipatif en fatigue de l'acier DP600. In *Les composites - De l'élaboration du matériau aux performances des structures*, pages 205–208, Aussois, France, 2011.
- [C1.14] T. Pottier, F. Toussaint, **H. Louche**, and P. Vacher. Experimental estimation of the Inelastic Heat Fraction from thermomechanical observations and inverse analysis. In *Conference Proceedings of the Society of Experimental Mechanics Series*, volume 7, pages 33–37, Mohegan Sun, États-Unis, 2011.
- [C1.15] S. Wen, **A. Chrysochoos**, Y. Monerie, and **B. Wattrisse**. Identification of Cohesive-Zone models using thermo-mechanical imaging techniques. In *PhotoMechanics 2011*, page 2 p., Bruxelles, Belgique, 2011.

- [C1.16] M. Bornert, P. Doumalin, J.-C. Dupré, C. Poilâne, L. ROBERT, E. Toussaint, and **B. Wattrisse**. Short remarks about synthetic image generation in the context of sub-pixel accuracy of Digital Image Correlation. In *ICEM15*, page 4 p., Porto, Portugal, 2012.
- [C1.17] D. Garcia, J.-J. Orteu, L. ROBERT, **B. Wattrisse**, and F. Bugarin. A generic synthetic image generator package for the evaluation of 3D Digital Image Correlation and other computer vision-based measurement techniques. In *PhotoMechanics 2013*, page Clé USB, France, 2013.
- [C1.18] F. Latourte, C. Toulemonde, J.-F. Rit, J. Sanahuja, N. Rupin, J. Ferrari, H. Perron, E. Bosso, A. Guery, J.-M. Proix, and **B. Wattrisse**. The materials ageing platform : towards a toolbox to perform a wide range of research studies on the behavior of industrial materials. In *PhotoMechanics 2013*, page Clé USB, Montpellier, France, 2013.
- [C1.19] L. Li, **J.M. Muracciole**, **L. Sabatier**, **L. Waltz**, and **B. Wattrisse**. Analysis of the thermo-mechanical behavior of coarse-grained polycrystalline aluminum under tensile conditions. In *PhotoMechanics 2013*, page Clé USB, Montpellier, France, 2013.
- [C1.20] S. Wen, Y. Monerie, **B. Wattrisse**, and **L. Sabatier**. Experimental identification of Cohesive Zone Models from thermo-mechanical imaging techniques. In *PhotoMechanics 2013*, page Clé USB, Montpellier, France, 2013.

Communications sans actes dans des colloques

- [C2.1] D. Iceta, **P. Alart**, and **D. Dureisseix**. A multiscale domain decomposition for the simulation of a non smooth structure, involving a numerical homogenization. In *18th International Conference on Domain Decomposition Methods - DD18*, Jerusalem, Israël, 2008.
- [C2.2] **P. Alart**, D. Iceta, T. M. Phuong Hoang, D. Dureisseix, and G. Saussine. Décomposition de domaine en dynamique granulaire par éléments discrets et application au ballast ferroviaire. In *19e Congrès Français de Mécanique - CFM09*, Marseille, France, 2009.
- [C2.3] **D. Dureisseix** and B. Marcon. A partitioning algorithm to couple diffusion and elasticity for the simulation of hygromechanical wood structures of Cultural Heritage. In *10th US National Congress on Computational Mechanics - USNCCM10*, Columbus, États-Unis, 2009.
- [C2.4] D. Iceta, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Two domain decomposition methods for granular dynamics. In *5th Contact Mechanics International Symposium (CMIS09)*, Chania, Grèce, 2009.
- [C2.5] B. Marcon, **D. Dureisseix**, **F. Dubois**, and **D. Jullien**. Couplage de codes en thermo-hygromécanique pour les panneaux peints en bois du patrimoine. In *19e Congrès Français de Mécanique - CFM09*, Marseille, France, 2009.
- [C2.6] **P. Alart**, **D. Dureisseix**, T. M. Phuong Hoang, and G. Saussine. Domain Decomposition methods for granular dynamics using discrete elements and application to railway ballast. In *7th Meeting on Unilateral Problems in Structural Analysis*, Palmanova, Italie, 2010.
- [C2.7] J. Colmars, **D. Dureisseix**, and **J. Gril**. A 1Dx2D model to simulate the hygromechanical response of panel paintings. In *4th International Conference of COST Action IE0601 : Interaction between Wood Science and Conservation of Cultural Heritage*, Izmir, Turquie, 2010.
- [C2.8] **F. Dubois**, **D. Dureisseix**, and B. Marcon. Code coupling for thermo-hygro-mechanical problems with application to wooden structures and painting supports of cultural heritage. In *5th European Conference on Computational Mechanics - ECCM2010*, Paris, France, 2010.
- [C2.9] D. Iceta, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Domain decomposition for granular dynamics : scalability issue. In *5th European Conference on Computational Mechanics - ECCM2010*, Paris, France, 2010.
- [C2.10] M. Chemkhi, D. Restraint, A. Roos, **L. Waltz**, and C. Demangel. Influence of surface mechanical attrition treatment on low temperature plasma nitriding of medical grade austenitic stainless steel. In *European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes*, Montpellier, France, 2011.

- [C2.11] V. Delobelle, D. Favier, and **H. Louche**. Determination of heat capacity and thermal conductivity of NiTi. In *International Conference on Martensitic Transformations (ICOMAT)*, Osaka, Japon, 2011.
- [C2.12] V. Delobelle, D. Favier, and **H. Louche**. Validation expérimentale d'estimations de sources de chaleur - Cas uniforme. In *CFM*, Besançon, France, 2011.
- [C2.13] V. Delobelle, D. Favier, and **H. Louche**. Use of resistance welding to join NiTi SMAs tubes. In *Archimat 2011*, Grenoble, France, 2011.
- [C2.14] V. Delobelle, **H. Louche**, and D. Favier. A new approach to estimate heat fields during stress or temperature induced phase transformation on a NiTi SMA - Experimental validation. In *International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST)*, Hong-Kong, 2011.
- [C2.15] **H. Louche**, V. Delobelle, and D. Favier. Experimental validation of heat source field estimations. In *Photomechanics 2011*, Belgique, 2011.
- [C2.16] T. Roland, **L. Waltz**, and D. Retraint. Electrochemical corrosion behavior of surface nanocrystallised stainless steel : effect of additional phase transformations (γ/α') by SPD. In *Euromat2011*, France, 2011.
- [C2.17] **L. Waltz**, P. Kanoute, and D. Retraint. Mechanical characterization of a SMATed 316L stainless steel : use of cyclic nanoindentation. In *EUROMAT2011*, France, 2011.
- [C2.18] A. Blanche, N. RANC, V. FAVIER, and **A. Chrysochoos**. Full-field calorimetric assessments for the characterization of the high cycle fatigue progress. In *International Conference on Fatigue Damage of Structural Materials IX*, Hyannis, États-Unis, 2012.
- [C2.19] M. Chemkhi, D. Retraint, A. Roos, C. Demangel, G. Montay, and **L. Waltz**. Evolution of the residual stress state after surface mechanical attrition treatment and low temperature plasma nitriding. In *International Conference on Residual Stresses*, Garmisch-Partenkirchen, Allemagne, 2012.
- [C2.20] M. Chemkhi, D. Retraint, A. Roos, C. Demangel, G. Proust, and **L. Waltz**. Microstructural evolution of a 316L alloy subjected to surface nanocrystallisation and low-temperature plasma nitriding. In *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*, Wollongong, Australie, 2012.
- [C2.21] G. Machado, **H. Louche**, D. Favier, and Y. Liu. Experimental characterization and modeling of the mechanical behavior of architected tube-based NiTi materials. In *Archimat 2012*, Prague, Tchèque, République, 2012.
- [C2.22] N.-L. Phung, A. Blanche, N. Marti, N. RANC, **A. Chrysochoos**, V. FAVIER, and H. Mughrabi. Microplasticity and dissipation for polycrystalline pure copper under very high cycle fatigue. In *Colloquium on Fatigue Mechanisms*, Poitiers, France, 2012.
- [C2.23] M. Chemkhi, D. Retraint, A. Roos, C. Demangel, and **L. Waltz**. Influence of a Nanocrystalline surface layer combined with low temperature plasma Nitriding on Microstructure and Tribological Properties. In *Materials Innovation in Surface Engineering*, Adélaïde, Australie, 2013.
- [C2.24] M. Chemkhi, D. Retraint, A. Roos, G. Montay, **L. Waltz**, and C. Demangel. Duplex surface treatments combining surface mechanical attrition treatment (SMAT) and low temperature plasma nitriding. In *International Workshop on Plasma-Based Ion Implantation and Deposition*, Poitiers, France, 2013.
- [C2.25] G. Proust, M. Gilles, M. Chemkhi, D. Retraint, A. Roos, C. Demangel, and **L. Waltz**. Microstructural Evolution of Stainless Steel after Surface Mechanical Attrition Treatment and Nitriding. In *International Conference on Recrystallization and Grain Growth*, Sydney, Australie, 2013.

Conférences invitées

- [I.1] **A. Chrysochoos**. Material transformation studies with full-field measurements. In *Photomechanics 2008*, pages CD–Rom, Loughborough, Royaume-Uni, 2008.
- [I.2] **P. Alart**, D. Iceta, T. M. Phuong Hoang, D. Dureisseix, and G. Saussine. Two domain decomposition strategies for granular dynamics using discrete elements. In *Free Boundary Problems, Applications to the fluid mechanics, friction and impact phenomena*, Saint Etienne, France, 2009.
- [I.3] **A. Chrysochoos**. Energy analysis of phase change localization in monocrystalline shape memory alloy. In *Stability and Nonlinear Solid Mechanics, symposium in honor of Nguyen Quoc Son*, Palaiseau, France, 2010.
- [I.4] **A. Chrysochoos**, A. Blanche, B. Berthel, and **B. Wattrisse**. Energy balance properties of steels subjected to high cycle fatigue. In *SEM 2011*, États-Unis, 2011.
- [I.5] **H. Louche**, P. Vacher, and R. Arrieux. Observations cinématiques et thermiques accompagnant l'effet PLC sur un alliage AlMg. In *Journée Vieillessement dynamique*, Paris, France, 2011.
- [I.6] **B. Wattrisse**, R. Caborgan, **J.M. Muracciole**, **L. Sabatier**, and **A. Chrysochoos**. Dissipative and coupling effects accompanying the natural rubber elongation. In *SEM2011*, Uncasville, États-Unis, 2011.
- [I.7] D. Favier, T. Alonso, G. Chagnon, V. Delobelle, **H. Louche**, G. Machado, **L. Waltz**, G. Rio, and Y. Liu. Mechanical behaviour of architected NiTi materials in complex loading. In *CIMTEC*, Italie, 2012.
- [I.8] N. Blal, **A. Chrysochoos**, **L. Daridon**, Y. Monerie, **S. Pagano**, **B. Wattrisse**, and S. Wen. Imagerie thermomécanique et changements d'échelles pour l'identification de modèles de zones cohésives. In *11ème colloque national en calcul des structures, CSMA2013*, Giens, France, 2013.

Rapports de recherche

- [R.1] **D. Dureisseix**, B. Marcon, J. Colmars, and **J. Gril**. Étude sur la conservation préventive des panneaux de bois peints. R.

Thèses

- [T.1] S. Vigneron. *Analyse thermomécanique multiéchelle de la transformation de phase dans les alliages à mémoire de forme*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2009.
- [T.2] R. Caborgan. *Contribution à l'analyse expérimentale du comportement thermomécanique du caoutchouc naturel*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2011.
- [T.3] A. Blanche. *Effets dissipatifs en fatigue à grand et très grand nombre de cycles*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2012.
- [T.4] S. Wen. *Identification expérimentale de modèles de zones cohésives à partir de techniques d'imagerie thermomécanique*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, December 2012.

Autres publications

- [W.1] **D. Dureisseix**. Méthodes numériques appliquées à la conception par éléments finis. 2008.
- [W.2] E. Malachanne, **F. Jourdan**, and **D. Dureisseix**. Numerical model of bone remodelling sensitive to loading frequency, 2008.
- [W.3] B. Orsal, R. Vacher, and **D. Dureisseix**. Optical noise of a 1550 nm fiber laser as an underwater acoustic sensor, 2008.
- [W.4] **D. Dureisseix**. Simulation de problèmes couplés multiphysiques par partitionnement, 2009.
- [W.5] **F. Dubois**, **D. Dureisseix**, and B. Marcon. Simulation of wooden structures and painting supports of cultural heritage with a code coupling for thermo-hygro-mechanical evolutions, 2010.
- [W.6] F. Toussaint, T. Pottier, **H. Louche**, and P. Vacher. Estimation de la puissance plastique convertie en chaleur à partir de mesures de champs et d'une analyse inverse, 2010.
- [W.7] **B. Wattrisse** and **H. Louche**. Approche thermomécanique et caractérisation du comportement des matériaux, 2011.
- [W.8] **H. Louche**. Quelques exemples d'apport des mesures de champs thermomécaniques dans l'étude du comportement des matériaux, 2012.
- [W.9] **H. Louche** and V. Delobelle. Estimation de sources de chaleur dans des cas 2D : méthodologie et exemples de validations, 2012.
- [W.10] **H. Louche**, **B. Wattrisse**, and V. Delobelle. Méthodes directes d'estimations de sources et validations numériques et expérimentale, 2012.

Troisième partie

Bilan scientifique des structures associées : GPTR-MGC et laboratoire MIST

8 Grand Plateau Technique pour la Recherche (GPTR-MGC)

Le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil a été retenu en 2008 lors de l'appel à projets GEPE-TOs visant à constituer le Grand Plateau Technique pour la Recherche - Mécanique et Génie Civil (GPTR-MGC). L'objectif de la région Languedoc-Roussillon consiste notamment à renforcer la compétitivité de la recherche en région LR sur le plan international et à doper l'innovation et la création d'activités en incitant et en favorisant l'accès aux ressources de pointe des unités de recherche par les entreprises régionales.

Le Grand plateau Technique pour la Recherche - Mécanique et Génie Civil, structure à caractère multi-sites, regroupe 5 partenaires :

Site 1 : la plate-forme Mécatronique, occupée par le service Expérimentation (ServEx) du LMGC,

Site 2 : la plate-forme Calcul Scientifique du service Réseaux, Moyens Informatiques et Calcul Scientifique (ReMICS) du LMGC.

Site 3 : la plate-forme Génie Civil du département GC de l'Institut Universitaire de Technologie de Nîmes.

Site 4 : la plate-forme Génie Mécanique et Productique du département GMP de l'Institut Universitaire de Technologie de Nîmes.

Site 5 : la plate-forme bois tropicaux et méditerranéens de de Unité de Recherche intitulée Biomasse, Bois, Energie, Bioproduits du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

1 Activité du GPTR-MGC

Structure

Le GPTR-MGC a mis en place une gouvernance qui s'appuie sur :

- un comité de pilotage qui comprend les responsables scientifique et technique du GPTR, l'administrateur, les responsables des 5 sites, le directeur du LMGC. Un représentant de la région LR est régulièrement convié à participer à ses réunions,
- un comité technique composé de correspondants du GPTR-MGC issus des différentes équipes de recherche associées et du monde socio économique,
- une direction constituée du responsable scientifique et du responsable technique,
- les statuts du GPTR-MGC qui sont en cours de refonte par l'université sous forme de convention avec les partenaires.

L'administrateur du GPTR assure sa gestion financière qui est effectuée dans le cadre d'un budget propre. La facturation des actions menées par le GPTR est assurée par les services de l'UM2 sur la base de devis établis par le responsable technique et acceptés par les partenaires.

Une politique tarifaire qui permet le calcul des coûts complets a été élaborée et validée en comité de pilotage. La grille de tarification est conforme aux habitudes des tutelles à savoir le CNRS et le CIRAD. La méthode de calcul du prix de revient fait intervenir les coûts salariaux directs chargés et non environnés des personnels permanents et non permanents impliqués dans le projet,

l'amortissement, les frais de maintenance et de jouvence des équipements employés, le coût des matériels consommables, les dépenses de prestations de service et dépenses de fonctionnement, les frais généraux relatifs aux infrastructures, les frais de gestion.

Relations partenariales

La direction du GPTR-MGC, s'est attelée à construire une offre de prestations et de collaborations cohérente. Elle s'est attachée à afficher cette offre et à la promouvoir auprès de nombreux partenaires industriels et institutionnels. Plus de 100 contacts industriels (autres que les prestations de R&D réalisées) ont été noués et 70 institutionnels ont été approchés. Les contacts industriels concernent des entreprises, PME/PMI et TPE engagées dans une démarche d'innovation ou qui souhaitent disposer de moyens matériels présents sur une des plate-formes du GPTR-MGC ou encore qui désirent bénéficier de l'expertise des personnels qui y sont affectés. Les contacts institutionnels ciblés sont les interlocuteurs directs des entreprises comme les CCI, PFT, OSEO, Transfert-LR, les pépinières d'entreprises et les incubateurs, les pôles de compétitivité régionaux, les agences (CEMATER etc.) et les centres techniques (CSTB, CETIM etc.). D'autres organismes comme le CHU, l'INRA, l'IRSTEA ont également été approchés. Le GPTR-MGC participe activement aux manifestations organisées par des entités régionales (BIC, Mécatronique LR, Club énergie 34, Séminaire plateaux techniques IRSTEA, etc.) et apparaît dorénavant dans l'offre de Transfert-LR. Le GPTR-MGC, comme entité fortement liée au LMGC, est également membre du pôle de compétitivité Optitec-Popsud pour les moyens en imagerie visible et Infra rouge de sa plateforme d'étude et de caractérisation du comportement mécanique et thermomécanique des matériaux.

Embauches

Le GPTR-MGC a embauché deux personnes sur des contrats de 18 mois conformément au projet présenté :

- Marine BAGNÉRIS a été recrutée en 2010 sur un poste de Post-doctorat (Exploitation et professionnalisation du code LMGC90). Les activités réalisées au cours de ce post-doctorat ont permis à M. Bagnéris d'obtenir un poste à l'école d'architecture de Marseille. Son départ a pour conséquence que l'investissement du service simulations numériques sur sa formation n'a pas pu être fructueux pour le développement de son action au sein du GPTR-MGC.
- Robin TIRADO a été recruté en 2011 sur un poste de Post-Master2 (développement de nouveaux partenariats). R. Tirado est impliqué pour l'aspect développement mécanique dans les projets de prestation et de collaboration du GPTR-MGC. Le GPTR-MGC n'ayant pas les moyens suffisants pour pérenniser son contrat, il a été embauché dans une entreprise régionale dès la fin de son contrat.

Matériels

Le GPTR-MGC a fait l'acquisition du matériel défini dans le projet GEPETOS. Un dispositif triaxial acheté à la société "Sol Mesures" est opérationnel. Les essais réalisés avec le dispositif ont donné des résultats très satisfaisants qui complètent fortement les moyens du laboratoire.

Le département génie-civil de l'IUT de Nîmes a réhabilité une presse de 400kN mais n'a pas eu la possibilité de réaliser les opérations nécessaires pour obtenir l'habilitation COFRAC de son matériel d'essai. Toutefois l'obtention de l'agrément reste un objectif du département.

Le directoire a élaboré un dossier FEDER à hauteur de 2M€ réparti en 1,02M€ d'équipement et 0,98M€ de fonctionnement avec un apport de 0,8M€. Le projet associait les partenaires du GPTR-MGC (LMGC, CIRAD, IUT) et des chercheurs de l'UMR IATE. La majeure partie du projet consistait en l'acquisition d'un nano-tomographe et d'une prototypeuse 3D. Le CNRS ayant tardé à répondre sur la tarification des personnels, le projet n'a pas pu être déposé à temps.

Récapitulatif de l'utilisation du GPTR-MGC

Les tableaux annexés montrent que le GPTR-MGC a été associé à 20 opérations de coopération ou de prestation pour un chiffre d'affaires global de 56k€ en 2009, 153k€ en 2010, 86k€ en 2011 et 68k€ en 2012. La baisse d'activité dès 2011 est caractéristique de la pérennisation de la crise économique. Les prestations industrielles représentent 78% de l'activité en 2009, 66% en 2010, 62% en 2011, 78% en 2012, ce qui montre que le GPTR-MGC répond bien à sa mission de mettre à disposition des entreprises les moyens matériels et l'expertise des personnels des plateaux techniques associés aux unités de recherche publique. Les actions sont très diverses, allant du conseil appuyé sur des analyses numériques fines, aux tests de produits et au développement de moyens expérimentaux spécifiques.

Actions de partenariats avec des entreprises

Dans le cadre du GPTR-MGC, les plate-formes qui le constituent ont traité 14 opérations industrielles avec 13 partenaires différents pour un chiffre d'affaire de 44k€ en 2009, 93k€ en 2010, 41k€ en 2011 et 53k€ en 2012. En 2009 nous avons abandonné 1 projet sur 7, aucun en 2010, 3 sur 9 en 2011, 7 sur 23 en 2012 (7 sont toujours en phase d'avant-projet). La plate-forme Calcul Scientifique du GPTR-MGC n'a pas pu répondre à des demandes industrielles faute de personnel.

Actions de communication et de promotion

Élaboration d'un site internet qui doit servir de plate-forme de présentation de l'offre du GPTR-MGC et d'outil collaboratif entre le prestataire et le client. Le site présente également les éléments qui permettent le calcul du coût des prestations.

Élaboration d'une plaquette de présentation de l'offre de prestation, expertise, mise à disposition de moyens et collaboration de R&D, réalisée en trois volets. Cette plaquette a été largement diffusée aux partenaires institutionnels régionaux et à des entreprises ciblées.

Les fiches techniques qui présentent les moyens matériels du GPTR-MGC ont été réalisées. Ce travail est actuellement bien avancé et ces fiches sont consultables sur le site web du GPTR-MGC www.gptr-mgc-um2-lr.fr.

Le GPTR-MGC est agréé pour mener des opérations de R&D éligibles au crédit d'impôt recherche et ce point fait l'objet d'une page d'information sur le site internet.

Collaborations inter-institutionnelles

Une collaboration au stade de l'avant-projet associe les moyens de mesure thermiques du LEMTA (UMR 7563).

Collaboration avec Polytech Montpellier pour la réalisation de pièces mécaniques originales.

Réalisation d'un Osmomètre innovant pour l'INRA et initiation d'un projet visant à l'élaboration d'un dispositif qui permet la structuration de biomolécules.

Formation des chercheurs, enseignants-chercheurs, extérieurs

Le responsable technique du GPTR-MGC a suivi une formation sur le Crédit Impôt Recherche. Le site du GPTR-MGC affiche les modalités qui permettent aux entreprises d'en bénéficier. Une formation aux techniques d'imagerie Infrarouge a été initiée pour la société Porter Novelli (Paris).

Élaboration en cours d'un catalogue qui regroupe l'offre de formation que peut dispenser le GPTR-MGC

2 Évolutions du GPTR

Augmentation du nombre de collaborations

Nous devons faire fructifier les contacts établis par une augmentation des prestations et des partenariats de recherche et développement. Le nombre d'avant-projets est en constante augmentation

ce qui montre un intérêt certain des entreprises sans toutefois aboutir sur des projets d'études. Cette activité chronophage est encourageante mais les responsables du GPTR-MGC ne peuvent continuer à travailler sur des avant-projets sans renfort humain.

Moyens

En attente de l'appel d'offre régional GEPETOS3 (reporté depuis 1 an), le GPTR-MGC prévoit d'inscrire l'embauche de deux Ingénieurs post-Master2 pour réaliser le suivi des installations certifiées, les études d'avant-projets et le soutiens aux projets nécessaires pour les entreprises. Un post-doc est envisagé pour répondre aux fortes demandes de simulations numériques. Le responsable technique (Y. El Kaïm) quitte le laboratoire en 2013 et son remplacement est prévu dans la continuité. Les matériels demandés pour le LMGC dans le projet FEDER sont toujours nécessaires au développement du plateau technique.

Amélioration de la qualité.

La demande des entreprises en matériel étalonné est croissante. Une politique de gestion de la maintenance a été mise en œuvre par la définition de critères (appréciation du risque, importance et charge d'un équipement) qui permet d'associer à une machine ou un appareil, un type de maintenance approprié.

Nous avons élaboré une politique de vérification métrologique régulière des équipements. Pour cela, nous avons acquis des moyens d'étalonnage internes et utilisé les services d'un prestataire externe : la société France-Qualité. Une procédure a été élaborée pour assurer en interne et en externe la vérification de nos moyens d'essais et leur bon raccordement. Les appareils font alors l'objet, de manière standard, d'un constat de vérification qui est archivé et disponible à tous. L'étalonnage certifié par le Comité français d'accréditation (COFRAC) est réservé aux moyens mis en œuvre dans des opérations qui le nécessitent expressément. Le GPTR-MGC est accrédité par le COFRAC (Comité Français d'Accréditation) pour ses essais sur les matériaux bois et dérivés selon la norme NF EN ISO/CEI 17025 (accréditation n° 1-1686). Cette accréditation concerne six essais sur les matériaux bois et dérivés selon les normes EN73, EN84, EN113, E117, EN118 et XP ENV 12038.

Le GPTR-MGC a engagé la procédure pour obtenir l'accréditation COFRAC pour plusieurs presses et un banc d'essais béton. La procédure prévue n'a pas pu être réalisée mais devrait pouvoir aboutir pour le prochain quinquennal. Les actions à mettre en œuvre afin d'améliorer notre système qualité consistent en un renforcement de notre système d'organisation par les actions suivantes :

- amélioration de notre maîtrise documentaire qui doit permettre une meilleure structuration et un meilleur accès à nos informations,
- renforcement de la traçabilité des essais et de l'archivage des données (y compris l'archivage pérenne),
- satisfaire aux principales exigences de la norme ISO9001 qui peut, si ce niveau de certification est exigé par nos partenaires, constituer un objectif à moyen terme.

Cette procédure ne pourra aboutir qu'avec le soutien des embauches prévues dans les moyens humains.

9 Laboratoire commun MIST

Le Laboratoire MIST est un Laboratoire commun, créé au 1^{er} juillet 2007, entre :

- l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN),
- Le CNRS - UMR 5508 – Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil (LMGC),
- l'Université Montpellier 2 (UM2).

1 L'organisation

Ce Laboratoire est le fruit d'une politique conjointe et volontariste visant à renforcer les synergies entre recherche théorique et appliquée dans le domaine de la sûreté nucléaire. La vocation de ce Laboratoire « sans mur » est double : d'une part proposer des outils de compréhension et de prédiction des phénomènes relevant explicitement de la sûreté nucléaire, d'autre part aborder des thématiques scientifiques plus vastes dont les retombées bénéficient à chaque partenaire et à leur communauté de recherche.

Le MIST a des actions de recherche fondamentale, en particulier en matière de modélisation de comportements complexes, de simulation numérique et d'identification expérimentale dans les domaines du combustible nucléaire et les principaux résultats appliqués obtenus concernent les thématiques de Recherche en Sûreté du Pôle Sûreté Nucléaire (IRSN/PSN-RES). De fait, la thématique globale du Laboratoire MIST concerne l'intégrité des structures hétérogènes et évolutives en lien avec des applications en sûreté nucléaire. Contractuellement, la définition et la mise en œuvre du Programme de Recherche du Laboratoire MIST relèvent des attributions du Comité de Pilotage et de la Direction du Laboratoire MIST. En particulier, le Comité de Pilotage (CoPil) est chargé :

- de définir, sur proposition de la direction du Laboratoire MIST, les programmes annuels détaillés de recherche s'inscrivant dans l'axe du Programme de Recherche général du Laboratoire et de veiller à la bonne exécution de ce dernier,
- d'évaluer et faire la synthèse annuelle des résultats obtenus dans le cadre du Programme.

De manière à assurer au mieux ces missions, la Direction du Laboratoire MIST fournit un document de synthèse annuel au CoPil.

Le Laboratoire MIST regroupe depuis sa création plus de vingt personnes, qui, par le jeu des quotités de temps affectées aux activités du MIST, représentent environ 10 ho.an. Les membres du MIST proviennent soit du laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) soit du Pôle Sûreté Nucléaire (IRSN/PSN-RES) (anciennement la Direction de la Prévention des Accidents Majeurs) et restent rattachés à leur entité d'origine. On trouve parmi eux à la date du 1 janvier 2014 :

- 2 secrétaires,
- 17 permanents (ingénieurs de recherche, chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs),
- 3 contractuels (post-doctorant ou doctorant).

La structuration du Laboratoire est faite à travers 3 Opérations de Recherche (OR), qui mettent en synergie les trois aspects de la mécanique à savoir l'expérimentation, la modélisation et la simulation numérique. Les trois OR sont :

- Fissuration et fragmentation

- Changements d'échelles
- Couplages multiphasiques.

Un correspondant (DPAM ou LMGC) a été nommé pour chacune de ces OR.

2 Bilan

L'objectif appliqué du Laboratoire du point de vue des missions de l'IRSN pourrait être résumé comme suit sur la période 2009-2014 :

comprendre, simuler et prédire les conditions d'une perte d'intégrité des structures de première barrière de confinement et ses conséquences. Les développements réalisés au sein du Laboratoire MIST pour atteindre cet objectif appliqué principal se font dans un cadre scientifique plus large qui vise notamment des retombées appliquées dans d'autres domaines d'intérêt de l'IRSN ou des partenaires du CNRS et de l'IRSN. A titre illustratif, on peut citer quelques domaines élargis d'application des trois Opérations de Recherche :

- Les méthodes de **changements d'échelles** ont une portée générale dans la gamme des problèmes relevant de la micromécanique : obtention de comportements équivalents, identification inverse de propriétés matérielles, analyse de sensibilité aux dispersions morphologiques, impact sur le comportement global d'une évolution temporelle des comportements locaux, optimisation topologique, etc. Il apparaît clairement que ces méthodes doivent constituer l'outil de base dans l'étude des effets du « vieillissement ».
- La **fissuration et la fragmentation**, notamment en dynamique rapide, possèdent aussi un vaste champs d'application : tenue aux impact, fragilisation par hydrogénation, écaillage de revêtements, endommagement sismique, etc. Ces méthodes sont aujourd'hui largement utilisées dans les études amont et appliquées de la DPAM depuis 2005. Couplées aux méthodes de changement d'échelles, ces méthodes constituent par exemple un outil particulièrement attractif pour la détermination de taux de fuite des structures bétonnées telles que des enceintes de réacteur.
- Les **couplages fluide-grains** ont eux aussi des potentialités d'applications large, en particulier dans de nombreux domaines relevant des missions de l'IRSN : colmatage de filtre, taux de bouchage, dispersion atmosphérique et transport fluvial de polluants, sédimentation-fluidisation, avalanches sous-marines, etc.

Sur le plan scientifique, les principales contributions du Laboratoire sur la période 2009-2014 peuvent se résumer comme suit pour chacune des OR :

OR - Fissuration et fragmentation

- Développement d'une méthode sur réseau tridimensionnelle pour la fragmentation des matériaux frittés.
- Mise en œuvre numérique de la méthode asymptotique numérique au modèle de zone cohésive.
- Identification expérimentale par imagerie mécanique de modèles de zone cohésive.
- Développement d'un logiciel de fissuration dynamique permettant le traitement des milieux périodiques.

OR - Changements d'échelles

- Développement d'une méthode statistique-numérique pour la détermination des volumes élémentaires représentatifs optimaux pour les matériaux hétérogènes quasi-fragiles.

- Développement d'une méthode d'homogénéisation basée sur la notion de composite de comparaison évolutif pour la modélisation jusqu'à rupture des composites à matrice métallique et à inclusions fragiles.
- Développement de modèles homogènes équivalents pour la thermoélasticité, la viscoplasticité et l'endommagement ductile des milieux poreux pressurisés à une ou deux échelles.

OR - Couplages multiphasiques

- Développement de deux méthodes pour les couplages fluide-grains, l'une de type Direct Numerical Simulation pour les collections à petit nombre grains, l'autre de type milieux poreux pour les collections à grand nombre grains.
- Obtention d'une statistique d'avalanche pour silos tubulaires.
- Réalisation d'une simulation de fluidisation à 160 000 grains.
- Modélisation des liens compacité-écoulement pour les milieux granulaires immergés.

Les principaux résultats marquants obtenus par le Laboratoire lors de la période 2007-2010 dans le cadre de son programme recherches appliquées en appui aux missions de la DPAM sont les suivants :

- Fourniture, de lois de comportement micromécaniques pour le combustible UO₂ et le gainage en Zircaloy-4 à tout taux de combustion .La fourniture de telles lois de comportement permet ainsi aux codes de calculs de la DPAM d'accroître leur pertinence, leur prédictivité et leur domaine de validation.
- Détermination de volumes élémentaires représentatifs optimaux pour simuler la fissuration des matériaux hétérogènes quasi-fragiles, application au Zircaloy hydruré.
- Identification inverse du degré d'anisotropie plastique de la matrice de Zircaloy irradié à tout taux de combustion.
- Evaluation du taux de relocalisation de combustible en situation de ballonnement à tout taux de combustion.
- Conception d'échantillons de béton numérique respectant la statistique morphologique et granulométrique.

Quatrième partie

Bilan des Services communs

1 Réseau, Moyens Informatiques et Calcul Scientifique (ReMICS)

- Les contours thématiques du service ReMICS s'appuient sur 3 axes :

Infrastructure Informatique (II)

Mettre à disposition et gérer : l'infrastructure réseau , les serveurs communs, les outils et services communs, les périphériques et les postes utilisateurs.

Système d'Information (SI)

Concevoir et développer le système d'information du laboratoire en relation avec les systèmes d'information des tutelles. Développer ou adapter des applications de gestion spécifiques et des applications web nécessaires aux opérations de recherche ou à l'organisation de manifestations scientifiques.

Calcul Scientifique (CaSc)

Mettre à disposition, offrir un support, développer et valoriser des logiciels de calcul scientifique pour la simulation numérique et l'exploitation de données expérimentales. Participer à des projets de recherche et réaliser des prestations pour des partenaires externes.

- Moyens humains :

Danielle Avinens-Bros : IR1 BAP E CNRS. Congé formation du 01/10/2011 au 31/08/2012. Détachement au CINES du 01/09/2012 au 31/03/2013. Mobilité en NOEMI à compter du 01/04/2013

Marine Bagneris : post-doc CNRS du 01/02/2010 au 31/07/2011

Gildas Cousin : TCN BAP E CNRS, CDD du 01/11/2011 au 04/11/2012

Frédéric Dubois : IR1 BAP E CNRS,

Alexandre Martin : IR2 BAP E CNRS, CDD du 01/04/2010 au 31/03/2011

Raphael Monod : post-doc CNRS du 07/01/2013 au 06/01/2014

Rémy Mozul : IR2 BAP E CNRS depuis le 01/12/12, CDD du 23/02/2009 au 30/11/2012

Gilles Requilé : IR0 BAP E CNRS départ à la retraite fin 2010

Kheira Sahli : IE2 BAP E CNRS

Paul Taforel : post-doc CNRS du 01/02/2013 au 31/01/2014

Yannick Sussmuth : AI BAP E CNRS, CDD depuis le 01/10/12

Thierry Vigo : Technicien UM2

On peut constater que le service ReMICS a connu de profondes évolutions dans son personnel support (départ à la retraite de Gilles Requilé et mobilité de Danielle Avinens-Bros).

Par ailleurs il connaît une forte activité en R&D et en soutien scientifique qui a nécessité le recrutement de nombreux CDD et a été soutenue par le recrutement d'un IR CNRS en 2012.

- Rayonnement et attractivité académiques :

Jean-François Remacle séjour de professeur invité financé par le CNRS du 15/09/2010 au 14/12/2010, suivi d'autres séjours en 2011 et 2012.

Assunta Venneri doctorante de l'université de Calabre du 05/11/2010 au 05/05/2011.

Lorenzo Leonetti doctorant de l'université de Calabre du 01/03/2012 au 15/03/2013.

Plusieurs visites courtes par an autour de la plateforme LMGC90

– Interaction avec l'environnement social :

Une majeure partie (70 %) de l'activité du service ReMICS concerne sa fonction support interne au LMGC, qui s'adresse aux membres du laboratoire, aux autres services communs (administration, expérimentation) ou à des actions de recherche. Toutefois un certain nombre de prestations réalisées s'étendent au delà du laboratoire. En effet le service ReMICS a toujours, dans la mesure du possible, offert des services à la communauté : hébergement de listes de diffusion, versionnement de projets, développement et hébergement de sites web de sociétés savantes et de colloques nationaux et internationaux, implication dans les réseaux professionnels (RESINFO, PLUME, etc) [B.5], mutualisation avec les services informatiques des autres laboratoires, etc. Par ailleurs depuis une dizaine d'années il coordonne le développement de la plateforme collaborative de modélisation et simulation LMGC90 ainsi que l'animation de sa communauté d'utilisateurs (académiques et privés). Par ailleurs plusieurs projets (GPTR MGC, Saladyn ANR-CIS, Degrip Oseo-FEDER) ou conventions ont été réalisés en s'appuyant sur le savoir faire du service en simulation numérique et sur LMGC90.

Le service a été certifié CTAI en 2013.

1 Infrastructure Informatique

Intervenants : Danielle Avinens-Bros, *Gildas Cousin*, Frédéric Dubois, Gilles Requilé, *Yannick Sussmuth*, Thierry Vigo

Mettre à disposition et gérer : le réseau , des serveurs communs, des outils et services communs, des périphériques et des postes utilisateurs.

1.1 Réseau

L'infrastructure réseau du LMGC s'appuie sur une dorsale fibre optique (Gbits/s) entre le point d'entrée HDMON qui est au LIRMM et les différentes baies de brassage des bâtiments et du câble cuivre RJ45 (100Mbits/s) entre les baies de brassage et les prises dans les bureaux. Tout le câblage date de la rénovation du bâtiment en 2002. Il n'y a pas eu d'évolution sensible dans le câblage réseau, seuls quelques espaces ont été aménagés en bureaux et ont nécessité des câblages additionnels.

Les équipements actifs consistent en :

- 1 Pare-feu Fortinet Fortigate 310B en entrée de site (date d'achat ???).
- 2 Routeurs Cisco 3550 redondants (date d'achat ???).
- 3 Switch Cisco xxx (1 à chaque étage) (date d'achat ???). Il est important de souligner que, faute de moyens, toutes les prises ne sont pas brassées au niveau des matériels actifs ce qui demande une intervention physique si il faut brasser une nouvelle prise. De plus les capacités des matériels actifs sont atteintes à 90 %.

Les flux IP sont séparés en 2 VLAN :

- un réseau routé, avec 2 classes d'adresses IP pour les machines devant accéder au réseau externe.
- un réseau non routé pour les machines n'ayant pas de nécessité d'accès au réseau externe comme les périphériques.

Un troisième VLAN verra le jour en Août 2013 dédié uniquement aux échanges de données pour les expérimentateurs de la halle.

Le contrôle d'accès sur les machines se fait via un annuaire NIS. Il gère aussi les montages automatiques du serveur de fichier lorsque souhaité. Un unique point d'entrée ssh est possible sur notre réseau.

Les services liés à la mobilité ont été mis en place lors du précédent contrat quadriennal. Il s'agit d'un réseau wifi privé qui est proposé grâce à un ensemble de bornes netgear (date d'achat ???) et d'un vpn proposé avec un matériel cisco vpn3000 (date d'achat ???). Les réseaux wifi de l'université de Montpellier 2 sont aussi disponibles via un réseau de bornes cisco (date d'achat ???).

1.2 Serveurs d'applications et de services

La quasi totalité des applications et services (mail, listes de diffusion, web, dns, nis, ldap, etc) sont exécutées dans des machines virtuelles XEN. Les comptes mail et les listes de diffusion ont progressivement été transférées sur les serveurs de l'université. Le service héberge des serveurs web pour des « sociétés savantes » (IASS, CEGEO, GDR, etc) ainsi que des listes de diffusion nationales (CSMA, MECAMAT, CASTEM).

Face à l'augmentation importante des machines virtuelles un nas a été acheté en 12/2011 (12To Raid 6) afin de sauvegarder les images.

Afin d'augmenter la qualité des services rendus il a été mis en place un ensemble d'outils de "monitoring" et de suivi d'incidents des installations réseau : webmin, zabbix.

1.3 Stockage des données

Le laboratoire n'a pas de politique globale de stockage, sauvegarde et archivage, cette décision est laissée à la discrétion des équipes ou des chercheurs. Un serveur de fichier SUN (Raid 5) acheté en xxxx et d'une capacité de 1 To permet de stocker et sauvegarder des données essentielles de l'ensemble du laboratoire. Ce serveur de fichier est accessible par les outils classiques (ftp/sftp) et est "montable" par chaque utilisateur en samba ou nfs. Sa capacité a été passée à 4 To en 12/2009 (1 To commun, 1 To MAB, 2 To Calcul Scientifique). La machine a été remplacée en 11/2012 et sa capacité passée à 9To (Raid 6).

1.4 Parc des postes utilisateurs et support

Le parc informatique est très disparate (machine sous Windows, Mac et Linux) et en constante augmentation. xxx machines (yyy Windows, zzz Linux et xxx-yyy-zzz Mac) ont été installées en moyenne chaque année. Afin d'avoir une meilleure visibilité sur le parc, sur son utilisation et sur la charge imposée sur le réseau, plusieurs outils de "monitoring" et gestion ont été récemment mis en place : OCS, GLPI.

GLPI permet en plus de l'inventaire et de la gestion du parc, d'avoir un suivi d'incidents et de demandes permettant de mieux formaliser les échanges avec les utilisateurs (particulièrement utile lors la mise en place du cryptage) et d'avoir une cohérence avec l'UM2 qui utilise ce même outil. Le service ReMICs continue néanmoins d'assurer son rôle d'assistance et formation indépendamment des apports de cet outil.

Enfin le service peut mettre en place, sur demande des utilisateurs, plusieurs outils de gestion de projet : subversion/trac, listes de diffusion, page web, cdash.

2 Système d'information

Intervenants : Kheira Sahli, Frédéric Dubois

Concevoir et faire vivre le système d'information du laboratoire avec un interfaçage aux SI des tutelles. Développer des applications de gestion spécifiques et des applications web nécessaires aux opérations de recherche ou à l'organisation de manifestations scientifiques.

2.1 Le système d'information du LMGC

Les missions assurées par cet axe sont :

l'administration, la maintenance et l'évolution du Système d'Information (SI) du LMGC (bases de données, Web, ...)

la sécurité des données

la rédaction de documents de présentation et d'utilisation des applications du SI

la vérification de la cohérence des données entre toutes les applications partageant les mêmes données

2.2 Développement de sites web

Le service assure la formation, le conseil et l'assistance aux utilisateurs sur l'utilisation et la création des sites web. Les sites actuellement hébergés au laboratoire sont : LMGC, GDR2519 CNRS, colloque CSMA 2011, colloque Mecamat 2013, colloque Photo Mechanics 2013, colloque Franco Polonais 2013, école thématique CNRS 2013, cours de l'école doctorale.

De plus le service assure la veille technologique dans ce domaine : évolution des applications logiciels web (Joomla, ezpublish), des bases de données et des normes associées.

2.3 Développement d'applications de gestion

Le service s'est investi dans le développement de plusieurs applications de gestion : inventaire, php_conges, publications, personnel. De plus, il se forme et installe les applications fournies par les tutelles (comme AGATE pour la gestion des congés des personnels CNRS).

3 Calcul Scientifique

Intervenants : *Marine Bagneris*, Frédéric Dubois, *Alexandre Martin*, *Raphael Monod*, Rémy Mozul, *Paul Taforel*

Doctorants : Alexandre Martin, Walid Saber-Cherif, Paul Taforel

Mise à disposition, support, développement et valorisation de logiciels et d'outils nécessaires aux activités de calcul scientifique pour la simulation et l'exploitation de données expérimentales sur les outils de calcul communs (cluster) ou des stations de travail personnelles. Participation à des projets de recherche (mise en place de stratégies de modélisation et développement d'outils de simulation) et à la réalisation de prestation pour des partenaires externes. Coordination des développements de la plateforme LMGC90. Animation de la communauté d'utilisateurs et de développeurs.

3.1 Moyens communs de calcul

Les moyens de calcul commun du LMGC pour la simulation numérique ont évolué depuis 2005 du serveur de calcul central (SUN) vers un "cluster" de machines plus légères et moins coûteuses. La politique du laboratoire est de faire évoluer les capacités du "cluster" au fil de l'eau par l'achat de nouveaux éléments et le recyclage des plus vieux. Aujourd'hui le cluster est séparé en deux types de machines :

- xx "cœurs" dans des machines SUN bi processeurs dont la plus jeune date de mars 2009, avec un serveur de fichier frontal (capacité effective 1.4 To) datant de 08/2006, le tout communiquant grâce à un switch Cisco-2960 (1 Gb/s) datant de mars 2009. Cette partie du "cluster" est en fin de vie.
- 272 "cœurs" dans des machines DELL avec 4 cartes mères bi-processeurs (1 en 12/2010, 2 en 12/2011, 1 en 07/2012, 1 en 05/2013), ainsi que 48 "cœurs" dans une machine DELL R815 quadri-processeur. Le serveur de fichier frontal propose un espace de 12To effectif (Raid 6) et l'interconnexion se fait par un switch DELL S60 (48 ports RJ45 Gb/s + 4 ports SFP+ 10Gb/s). 2 machines 16 "cœurs" dotées de GPU (Nvidia M2070Q) sont dédiées au post-traitement et à la visualisation déportée. Ces machines sont connectées au serveur de fichiers par des ports SFP+ .

Sur le cluster il est proposé de nombreux compilateurs, dont les compilateurs fortran payants de Intel et Portland, un outil de “debugging” parallèle (DDT de Allinea) et des logiciels de calcul comme LMGC90, Xper, Cast3M, Code_Aster, Abaqus (acheté en 2012).

Les investissements ont été réalisés à 15 % par le service ReMICS sur des contrats propres, à 15 % par une contribution du laboratoire, 10 % par les équipes et 60 % par le laboratoire MIST.

Lorsque les besoins de calcul dépassent les ressources du laboratoire il est fait appel au meso-centre HPCLR co-financé par la région et l’université de Montpellier 2.

En 2013 il a été mis en place des moyens communs de stockage et de calcul pour l’expérimental. En effet le traitement des données devient de plus en plus important. Un mini “cluster” a été mis en place autour d’un serveur de fichiers DELL de 36To effectif (Raid 6) et de deux nœuds de calcul 16 “cœurs” (1 Linux avec GPU et 1 Windows).

3.2 LMGC90

LMGC90 étant la plateforme logicielle de capitalisation du laboratoire, un effort constant de maintenance a été fourni [C1.6]. Les principaux points concernent l’amélioration de son interface (aussi bien l’interface utilisateurs en Python que son API pour les couplages), l’utilisation de nouvelles bibliothèques de résolution (MUMPS, Siconos/Numerics), faciliter l’installation aux nouveaux utilisateurs et enrichir le pré-processeur [C1.7].

Concernant les développements scientifiques les principaux points sont : l’intégration d’un modèle de fluide en milieu poreux, la parallélisation du code, l’amélioration de la résolution des problèmes de contact thermique ainsi que l’implémentation d’une méthode érosion pour la simulation de fissuration.

Dans le cadre de collaboration avec d’autres organismes/labo/industriels, LMGC90 a été couplé avec de nombreux autres logiciels (Siconos, Code_Aster, Peligriff) afin d’élargir les champs d’étude possibles [C1.8].

Afin de consolider la communauté des utilisateurs, plusieurs manifestations sont organisées chaque année : une formation utilisateurs débutants, les journées utilisateurs, des ateliers d’utilisation dédiés à certains thèmes. La communauté des développeurs devenant plus conséquente, il est prévu d’organiser, à partir de cette année, une formation orientée vers le développement dans la plateforme.

3.3 Soutien à des activités de recherche et de valorisation

Le groupe Calcul Scientifique de ReMICS a participé et porté de nombreuses opérations de recherche. Il contribue à la diffusion de la connaissance en modélisation des milieux divisés [B.2, B.4]

Enrichissement de la DEM

Modélisation des milieux granulaires polyhédriques [C1.1, B.1, B.3, ?].

Calcul intensif par décomposition de domaine appliqué au calcul des maçonneries [C2.9, A.4].

Couplage FEM-DEM en collaboration avec l’INSA de Lyon [C1.3, A.2] pour l’étude des applications tribologiques (thèse de H.P. Cao) et avec la SNCF pour l’étude du rôle du sol sur le comportement du ballast (post-doc de Paul Tadorel).

Multi-représentation et réduction dans le cadre du projet ANR Saladyn en partenariat avec EDF R&D, le LAMSID, l’INRIA Rhône-Alpes et Schneider Electric [C1.2, C2.7, ?] (CDD de Rémy Mozul et post-doc de A. Lozovskiy)

Modélisation des couplages thermo-hygro-mécanique

Modélisation de panneaux peints en collaboration avec les équipes MAB et ThM2 [C2.1, C2.3, W.1] (thèse de B. Marcon). Modélisation du soudage [C1.4]

Modélisation de l'enfoncement de pieux dans un sol saturé en eau dans le cadre de conventions de recherche avec la société Hydro-Québec (stage de B. Ghezahenem).

Modélisation de l'injection de CO_2 dans une roche saturée en eau dans le cadre d'une collaboration avec l'IFPEN (thèse de W. Saber-Cherif)

Fissuration, fragmentation

Amélioration des méthodes CZM dans le cadre du Laboratoire MIST [A.1, C2.2], mise en place d'un intégrateur explicite et d'une méthode parallèle (post-doc de Raphael Monod). Travaux exploratoires sur la mise en place de nouvelles lois en collaboration avec le LMA [C2.4]

Développement d'une méthode d'érosion en collaboration informelle avec Anna Pandolfi et Lorenzo Leonetti.

Couplages fluide-grains

Modélisation d'un mélange gas-grain [?, ?]. Collaboration avec J.F. Remacle.

Modélisation de l'écoulement de particules dans un fluide incompressible [I.1, C1.8, C1.11, A.3, C2.8] dans le cadre du laboratoire MIST.

Modélisation des maçonneries

Mise en données géométriques de structures complexes (post-doc de Marine Bagneris) [C1.5]. Application à des calculs sur des ouvrages anciens comme les Arènes de Nîmes.

Modélisation de la vulnérabilité sismique de maçonneries dans le cadre d'une collaboration avec la société Geoter (projet de R& D collaboratif Degrip et thèse de P. Taforel) [C1.9, C1.10, C1.13].

Conventions de recherche avec la ville de Nîmes, avec Saint-Gobain Recherche et avec la société NECS.

Collaborations informelles avec l'université de Pise (Maria Girardi), de Calabre Cosenza (Assunta Veneri [C1.12]), d'Oxford (Alejandra Albuérne), Eucentre (Andrea Penna) et l'université de Bordeaux (Marie Sauve).

Modélisation des massifs rocheux fracturés

Collaboration de longue date avec l'école des Mines d'Ales [C2.5], qui a plus récemment porté sur la modélisation du creusement d'un tunnel dans le massif de Saint Béat dans le cadre d'une collaboration avec l'école des Mines d'Ales (thèse de Hang Tran) [C2.6].

Modélisation du massif de Séchilienne dans le cadre du projet ANR Slams (thèse de Vincent Lebrouc).

Bibliographie

Articles dans des revues

- [A.1] F. Perales, **F. Dubois**, Y. Monerie, B. Piar, and L. Stainier. Code coupling (Xper) and application to fracture. *European Journal of Computational Mechanics*, 21 :242–253, 2010.
- [A.2] C. Hong-Phong, **M. Delenne**, **F. Dubois**, and Y. Berthier. Coupling Continuous and Discontinuous Descriptions to Model First Body Deformation in Third Body Flows. *Journal of Tribology*, 133 :041601–1 041601–7, 2011. **.
- [A.3] V. Topin, **F. Dubois**, Y. Monerie, F. Perales, and A. Wachs. Micro-rheology of dense particulate flows : Application to immersed avalanches. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 166 :63–72, 2011.
- [A.4] V. Visseq, A. Martin, D. Iceta, **E. Azéma**, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Dense granular dynamics analysis by a domain decomposition approach. *Computational Mechanics*, 49 :709–723, 2012. ***.
- [A.5] **E. Azéma**, **F. Radjai**, and **F. Dubois**. Packings of irregular polyhedral particles : Strength, structure, and effects of angularity. *Physical Review E*, 87 :1–15, 2013. **.

Participations à un ouvrage

- [B.1] **F. Dubois**. Particules polyédriques. In *Modélisation numérique discrète des matériaux granulaires*, pages 261–290. Hermes - Lavoisier, 2010.
- [B.2] **F. Radjai** and **F. Dubois**. *Modélisation numérique discrète des matériaux granulaires*. ISTE, 2010.
- [B.3] **F. Dubois**. Numerical modeling of granular media made of polyhedral particles. In *Discrete-element modeling of granular materials*, pages 233–262. ISTE - Wiley, 2011.
- [B.4] **F. Radjai** and **F. Dubois**. *Discrete-element modeling of granular materials*. Wiley-Iste, 2011.
- [B.5] O. Brand-Foissac, L. Chardon, M. David, M. Libes, **G. Requile**, and A. Rivet. *Guide de bonnes pratiques pour les Administrateurs Systèmes et Réseaux*. Mission Ressources et Compétences Technologique CNRS, 2012.

Communications avec actes dans des colloques

- [C1.1] **E. Azéma**, **F. Radjai**, R. Peyroux, **F. Dubois**, and G. Saussine. Vibrational dynamics of 3D granular media composed with polyhedral grains—Dinámica vibracional de un medio granular 3D compuesto de partículas poliédricas. In *IX Congreso de Geotecnia, Sociedad Colombiana de geotecnia*, page 8, Bogotá, Colombie, 2008.
- [C1.2] **F. Dubois** and M. Jean. Frictional Contact Numerical Models for Numerous Collections of Rigid or Deformable Bodies. In *Proceedings of the 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference*, page 2p., Portugal, 2009.

- [C1.3] **M. Delenne**, H. P. Cao, and **F. Dubois**. Impact of interaction laws and particle modelling in discrete element simulations. In *Powders and grains 2009*, volume 1145, pages 788–791, Golden, Colorado, États-Unis, 2009. S. Luding.
- [C1.4] **C. Bordreuil** and **F. Dubois**. A Generic Framework for Natural and Finite Element Method. In *Proceedings of the IV European Conference on Computational Mechanics*, page 2p., France, 2010.
- [C1.5] M. Bagneris, **F. Dubois**, A. Martin, **R. Mozul**, and P. Taforel. De l'intérêt de la courbure dans les interfaces : application aux structures en pierre. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.6] **F. Dubois**, M. Jean, **M. Delenne**, **R. Mozul**, A. Martin, and M. Bagneris. LMGC90. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.7] A. Martin, M. Bagneris, **F. Dubois**, and **R. Mozul**. Conception d'un outil adapté à la mise en données des systèmes discrets. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.8] F. Perales, V. Topin, **F. Dubois**, Y. Monerie, B. Piar, and A. Wachs. Des outils de simulation de rupture dynamique de matériaux hétérogènes (Xper) et d'écoulements granulaires immergés (ApoloGRIFF). In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.9] P. Taforel, **F. Dubois**, A. Martin, **R. Mozul**, and **S. Pagano**. Feedback on modeling issues of assemblies made of polyhedral objects through non smooth discrete element methods. In *Proceedings of Euromech Colloquium 516*, page 2p., France, 2011.
- [C1.10] P. Taforel, **F. Dubois**, A. Martin, and **S. Pagano**. Développement de formulations dynamiques adaptées à la modélisation par éléments discrets de structures maçonnées sous chargements sismiques. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.11] V. Topin, **F. Dubois**, Y. Monerie, F. Perales, **F. Radjai**, and A. Wachs. Modélisation numérique et étude de l'effondrement d'une colonne de grain dans un fluide. In *10e colloque national en calcul des structures*, page Clé USB, Giens, France, 2011.
- [C1.12] A. Venneri, P. Taforel, and **F. Dubois**. Modelli di pannelli murari rinforzati con fibre naturali : analisi numerica e sperimentale. In *Proceedings of the AIAS*, page 10p., Palerme, Italie, 2011.
- [C1.13] P. Taforel, **F. Dubois**, and **S. Pagano**. Evaluation of numerical uncertainties on the modeling of dry masonry structures submitted to out-of-plane loading, using the NSCD method in comparison with experimental test. In *Proceedings of the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, page 19 p., Vienne, Autriche, 2012.

Communications sans actes dans des colloques

- [C2.1] B. Marcon, **D. Dureisseix**, **F. Dubois**, and **D. Jullien**. Couplage de codes en thermo-hygro-mécanique pour les panneaux peints en bois du patrimoine. In *19e Congrès Français de Mécanique - CFM09*, Marseille, France, 2009.
- [C2.2] V. Acary, **F. Dubois**, and Y. Monerie. Non Smooth Fracture Dynamics (NSFD). In *ECCM IV - IV European Congress on Computational Mechanics : Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering*, Paris, France, 2010.
- [C2.3] **F. Dubois**, **D. Dureisseix**, and B. Marcon. Code coupling for thermo-hygro-mechanical problems with application to wooden structures and painting supports of cultural heritage. In *5th European Conference on Computational Mechanics - ECCM2010*, Paris, France, 2010.
- [C2.4] **F. Dubois**, F. Lebon, and A. Rekik. Computational methods for masonry structures : interface modeling and dynamics. In *IV European Conference on Computational Mechanics*, Paris, France, 2010.

- [C2.5] A. Rafie, M. Vinches, and **F. Dubois**. The Non-Smooth Contact Dynamics method applied to the mechanical simulation of a jointed rock mass. In *ENOC 2011*, Rome, Italie, 2011.
- [C2.6] T.-T.-H. Tran, S. Mahe, **F. Dubois**, and M. Vinches. Methodology for tunnel excavation modeling in a fractured rock mass using a discrete element approach : application to the Saint - B at tunnel - France. In *9 th Euroconference on Rock Physics and Geomechanics*, Norv ge, 2011.
- [C2.7] **R. Mozul** and **F. Dubois**. Of the designing of a software dedicated to the numerical simulation of contact dynamics problems. In *The 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics*, Stuttgart, Allemagne, 2012.
- [C2.8] **F. Radjai**, V. Topin, **F. Dubois**, F. Perales, and Y. Monerie. Modeling submarine avalanches. In *Colloque annuel du GdR MeGe*, La Rochelle, France, 2012.
- [C2.9] V. Visseq, A. Martin, **D. Dureisseix**, and **P. Alart**. Issues in domain decomposition method dedicated to non-smooth contact dynamics. In *Euromech 514 : New trends in Contact Mechanics*, France, 2012.

Conférences invitées

- [I.1] **F. Dubois**. New trends in improvement and application of discrete element methods. In *Fifty Years of Finite Freedom Mechanics*, France, 2010.

Rapports de recherche

- [R.1] A. Lozovski, **L. Daridon**, **F. Dubois**, and **S. Pagano**. The method of a floating frame of reference for non-smooth contact dynamics. R.

Autres publications

- [W.1] **F. Dubois**, **D. Dureisseix**, and B. Marcon. Simulation of wooden structures and painting supports of cultural heritage with a code coupling for thermo-hygro-mechanical evolutions, 2010.

2 Service expérimentation (ServEx)

1 Présentation du service

Le Service « Expérimentation » du LMGC (ServEx) a été créé en janvier 2008. Il est organisé sous la forme d'un plateau technique, regroupant l'ensemble des activités expérimentales du LMGC. Ce plateau est localisé dans la halle d'expérimentation occupant 700m², soit 60% de la surface totale, du bâtiment 3 du Campus Saint-Priest de l'Université Montpellier 2. La halle est organisée en 3 blocs fonctionnels, géographiquement bien séparés : « Conception », « Ateliers » et « Manipulations ». La partie « Manipulations » est exploitée par les équipes Conception en Structures (CS), Couplages en Géomécanique et Biomatériaux (CGB), Mécanique de l'Arbre et du Bois (MAB), Physique et Mécanique des Matériaux Granulaires (PMMG) et ThermoMécanique des Matériaux (ThM2). Les équipements expérimentaux de l'équipe Assemblages Soudés (AS) sont localisés à l'IUT de Nîmes, et bénéficient également de l'appui technique du ServEx.

Le service regroupe 5 personnes (dont l'une est en détachement pour un an au CHRU de Montpellier depuis le 1^{er} juin 2013) : 2 Ingénieurs de Recherche CNRS (mécanique des matériaux (L. Sabatier) et électronique (Y. El Kaïm)), 1 Assistant Ingénieur CNRS (électronique (P. Valorge)), et 2 techniciens en conception/fabrication mécanique (CNRS (A. Clary) et UM2 (G. Camp)). Une secrétaire est aussi affectée au quart de son temps pour assurer la gestion administrative et financière du service. Le service est dirigé par un enseignant chercheur du laboratoire dont les activités de recherche contiennent un fort volet expérimental.

Il est à noter que le service a connu de fortes évolutions dans son personnel au cours des quatre dernières années : départ à la retraite de G. Denayer (AI-CNRS/électronique en 2010), arrivée de L. Sabatier (IE-CNRS/mécanique en 2009) et de P. Valorge (AI-CNRS/Électronique en 2010). D'autres évolutions sont à venir à très court terme : départ à la retraite d'A. Clary (TCE-CNRS/Mécanique en septembre 2012) et arrivée de S. Devic (AI-CNRS/Mécanique en septembre 2012). Ces changements se sont accompagnés d'une réorganisation des tâches de chacun (voir organigramme).

Le ServEx dispose d'une ligne de budget propre qui lui permet d'avoir les moyens nécessaires pour mener à bien ses différentes missions :

- assister les chercheurs dans la conception et la réalisation de dispositifs expérimentaux, tant sur les parties mécaniques (matériels), électroniques (acquisition de données) et électromécaniques (actionneurs) ;
- assister les chercheurs dans la mise en place d'outils d'analyse et de traitements de données ;
- participer à la conduite d'expériences, et à l'interprétation des résultats ;
- mettre en œuvre la politique du laboratoire en matière d'allocation dynamique des salles d'expérimentation ;
- promouvoir et appliquer la politique du laboratoire en termes de mutualisation des moyens expérimentaux ;
- garantir le bon fonctionnement des moyens expérimentaux et la fiabilité des mesures ;
- assurer le suivi et la maintenance des moyens de fabrication ;
- intervenir comme support au Grand Plateau Technique Régional « Mécanique et Génie Civil » adossé au laboratoire ;
- veiller, en interaction avec les services centraux de l'université, à l'entretien des infrastructures de la halle d'expérimentation.

Le service est doté d'un organe de pilotage : le Comité d'Utilisateurs de la Halle de Mécatronique (CUHM) regroupant le responsable de service, les responsables des pôles « Mécanique » et « Electronique » de ServEx, le responsable Hygiène et Sécurité du site, le responsable technique du GPTR et un représentant de chaque équipe impliquée dans des activités expérimentales. Ce comité se réunit environ deux fois par an pour fixer les priorités sur les actions relatives à la mutualisation des moyens et à l'affectation dynamique des salles.

L'animation courante du service est effectuée au moyen de réunions de service régulières qui permettent de définir les priorités en termes d'achat, de faire le point des projets importants en cours et de prioriser les demandes.

2 Activités du service

Les activités du service sont le reflet de ses missions. Elles sont présentées dans les paragraphes qui viennent en les regroupant dans les catégories suivantes : (i) développement de moyens d'essais et d'instrumentations, (ii) réalisation et suivi d'essais, (iii) formation et soutien technique, (iv) développement d'outils numériques, (v) achat, suivi et maintenance des matériels, (vi) mutualisation des moyens, et enfin (vii) animation de réseaux techniques.

2.1 Développement de moyens d'essais et d'instrumentations

Une part importante de l'activité du ServEx correspond à un soutien « au quotidien » des chercheurs et des étudiants : réalisation de pièces mécaniques (adaptations, échantillons, ...) ou de montages électroniques spécifiques (adaptation/interfaçage de capteurs : balances, jauges de déformation, conductimètres, ...) en réponse à leurs demandes. L'autre volet de l'activité est associé à la réalisation de projets plus conséquents proposés par les équipes de recherches. Durant le quadriennal passé, environ une centaine de tels projets ont été menés à bien. On ne rappelle ici que les plus représentatifs de l'activité du service : nouveau dispositif de synchronisation d'acquisition de données « SynchroCam 2 » (aux performances notablement accrues par rapport à la génération précédente : multi-caméras, multi-voies, fréquences d'acquisition de 1 MHz), bancs de positionnement pour caméras optiques, dispositifs de comptage électroniques pour quantifier précisément les instants d'acquisition d'images, banc d'essais environnemental sur tissus biologiques, portique modulable pour structures de tenségrité, banc d'essais de retrait/gonflement sur matériaux mous, table de translation à deux axes motorisés pour l'étalonnage de caméras infrarouges, *etc.*

2.2 Réalisation et suivi d'essais

Le service est très régulièrement mis à contribution pour participer à la réalisation d'expériences. Généralement, il s'agit d'essais mécaniques (monotones, cycliques) instrumentés avec mesures optiques (corrélation/stéréo-corrélation d'images numériques et/ou thermographie infrarouge) ou bien d'essais triaxiaux sur des échantillons de sols. Le service assure l'élaboration des échantillons, la réalisation des adaptations sur les machines d'essais. Il participe à la définition des protocoles, ainsi qu'à l'exécution et le suivi des essais.

2.3 Formation et soutien technique

Le service assure un rôle important au niveau de la formation et du soutien technique aux membres permanents et non-permanents du laboratoire. Les principales actions portent sur la mise en place de formations (contenu, supports et présentations) en interne sur la corrélation et la stéréo-corrélation d'images numériques, l'imagerie rapide, la thermographie infrarouge, l'utilisation de certains systèmes d'acquisition spécifiques.

En 2010, à la demande de la délégation du Languedoc-Roussillon, le service a aussi accueilli en tutorat, et pour une durée de 10 mois, un technicien électronicien d'une unité CNRS de l'Université Montpellier 2. Notre action a été positive puisqu'elle a contribué à permettre à cette personne de se former à certains outils d'électronique moderne et de réintégrer son unité dans de bonnes conditions.

De plus, les membres du service passent un temps important à encadrer et à soutenir, sur les aspects techniques, les nombreux étudiants (Master, ingénieurs, doctorants et post-doctorants, français et étrangers) accueillis au laboratoire. Pour finir, certains membres ont aussi participé à des actions de formation vis-à-vis des étudiants de l'école doctorale « Information Structures Systèmes » (mise en place d'un cours d'instrumentation sur LabView).

2.4 Développement d'outils numériques

L'activité du service comporte aussi un volet numérique important associé au développement et à la mise en place d'outils numériques génériques (principalement traitements de données et interfaces utilisateur/capteurs). Dans ce cadre, on peut citer *(i)* la mise en place d'outils de pré et de post traitement d'essais (mécaniques, thermiques, hygrométriques, ...), *(ii)* le développement d'une librairie spécifique de fonctions de traitement d'image (cinématique, thermique et calorimétrique), *(iii)* la création d'interfaces LabView pour le pilotage d'essais et l'acquisition de données, etc.

2.5 Achat, suivi et maintenance des matériels

Le service met régulièrement ses compétences et son savoir-faire techniques au service du laboratoire en intervenant, aux côtés des chercheurs, dans l'achat de matériels spécifiques (qu'ils soient mutualisés ou non), au niveau de la définition des spécifications, des échanges avec les fournisseurs et du choix des matériels. Nous participons aussi à la réception et aux phases de tests des matériels. Ces dernières années, nous avons ainsi contribué à l'achat de matériels optiques (tables de micro-positionnement, caméra infrarouge portable, dispositifs de stéréo-corrélation, ...), matériels de régulation de l'environnement (enceinte climatique, boîte à gants, ...), ...

Concernant le suivi et la maintenance des matériels, nous avons poursuivi les actions entamées sur la période précédentes. En particulier, la petite maintenance mécanique des machines conventionnelles est régulièrement assurée par les techniciens de l'atelier de mécanique alors que l'entretien électrique est confié aux électroniciens.

2.6 Mutualisation des moyens

Un travail important a été mené ces dernières années sur la mutualisation des moyens expérimentaux du laboratoire. Les locaux expérimentaux du laboratoire ont été réorganisés de manière importante pour faciliter la mutualisation de certains dispositifs et pour permettre le développement d'activités expérimentales dans les équipes créées lors du dernier quadriennal.

Dans ce cadre, les salles suivantes, dédiées à des activités mutualisées, ont été mises en place : essais mécaniques, préparation d'échantillons, observation d'échantillons, stockage de matériels. Nous avons profité de ces changements pour faire aussi évoluer les installations de nos salles (installation/remplacement de climatiseurs afin d'améliorer le confort des utilisateurs, et remplacement d'une hotte aspirante pour des questions de sécurité).

Un effort important a été fait pour augmenter l'espace dédié aux expérimentations sur des échantillons biologiques. Une salle dédiée à ces activités, respectant les normes de confinement L2 a ainsi été aménagée : implantation dans nos locaux, ameublement, et installation ont été finalisés courant 2013.

2.7 Animation de réseaux techniques

Le service « Expérimentation » soutient de manière particulièrement active le GPTR-MGC adossé au laboratoire : une part importante (environ 50%) de l'activité d'Y. El Kaïm est associée à la gestion technique de cette plateforme. Par ailleurs, les membres du service ont régulièrement été impliqués dans la réalisation des projets traités par le GPTR.

G. Camp est très investi dans le réseau des mécaniciens des délégations Languedoc-Roussillon et Midi-Pyrénées. Il participe activement à la vie de ce réseau et notamment à l'organisation de journées d'échange d'expérience et de formation (regroupant en général une trentaine de participants issus des

DR13 et 14). Il a organisé cette année une journée thématique sur la « Métrologie sans contact » pour les 10 ans du réseau régional des mécaniciens.

Dans le cadre du GDR2519, L. Sabatier coordonne depuis 2012 les activités expérimentales d'un benchmark portant sur l'évaluation des propriétés métrologiques de différents systèmes de stéréocorrélation. Cette action regroupe actuellement une dizaine de laboratoire français, et elle est en train de s'élargir à des laboratoires étrangers (Belgique, USA).

3 Evolution des activités du service

La structure du ServEx et ses activités au sein du laboratoire sont désormais bien établies. Les évolutions qui se dessinent pour les années qui viennent portent donc essentiellement sur les interactions que nous aurons avec notre environnement extérieur.

L'activité du réseau des électroniciens est assez réduite au sein de notre délégation régionale. P. Valorge souhaite s'investir, avec le concours de la délégation, pour le réactiver. L'arrivée prochaine, sur le site de Saint-Priest, de nos collègues de l'Institut d'Electronique du Sud (IES) devrait faciliter cette action.

Il sera aussi important pour nous de saisir l'opportunité de cette prochaine unité géographique avec nos collègues des « Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes » du Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM) et de l'Institut d'Electronique du Sud (IES). Elle sera l'occasion de renforcer nos collaborations avec les plateformes techniques de ces importants laboratoires et de créer une réelle dynamique au sein du Comité Thématique d'Etablissement « Mathématiques, Informatique, Physique et Systèmes » de l'Université Montpellier 2.

Il existe, depuis toujours, de bonnes relations entre les membres de ServEx et le personnel technique affecté aux formations de mécanique des différentes composantes d'enseignement de l'UM2. Ces bonnes relations sont essentielles car elles permettent à chacun de pouvoir bénéficier facilement d'une large gamme de moyens. Il sera important, à l'avenir, de conserver et de renforcer ces collaborations avec les structures d'enseignement, notamment au travers le projet de la mise en place de la plateforme de valorisation régionale de l'Union des Industries et des Métiers de la Métallurgie en Languedoc Roussillon.

Pour finir, au niveau interne, il est envisagé de créer, un groupe d'utilisateurs des techniques d'imagerie afin de mettre en commun les expériences et les activités de chacun sur cette activité transversale au laboratoire.